

На правах рукописи



ВАСИЛЬЕВ СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ

**МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНШЕЙНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ**

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные
и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева» на кафедре «Основы конструирования машин»

Научный консультант

Заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор
ЕРЕСКО Сергей Павлович

Официальные
оппоненты:

МАРТЮЧЕНКО Игорь Гаврилович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
кафедра «Строительные и дорожные машины»,
заведующий;

СЛАДКОВА Любовь Александровна
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Военно-технический университет»,
г. Балашиха, кафедра естественных и общетехни-
ческих дисциплин, заведующая;

ЗЕДГЕНИЗОВ Виктор Георгиевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО НИ «Иркутский государственный
технический университет», кафедра «Строитель-
ные, дорожные машины и гидравлические систе-
мы», заведующий

Ведущая организация

**ФГБОУ ВПО «Братский государственный
университет»**

Защита диссертации состоится «27» мая 2014 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190103, Санкт-Петербург, ул. Курляндская, д. 2/5, ауд. 340-К
Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Диссертация, автореферат и другие материалы дела также представлены на сайте http://dis.spbgasu.ru/dis_councils

Автореферат разослан

« ____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к. т. н., доцент



Елена Михайловна Олещенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Открытие и освоение месторождений полезных ископаемых на территории Восточно-Сибирского региона связано с выполнением большого объема земляных работ, которые в основном ведутся в зонах расположения сезонно-мерзлых и вечномерзлых грунтов. Разработка сезонно-мерзлых грунтов характеризуется разнообразием способов и парка землеройно-транспортных машин, в котором определенное место занимают траншейные экскаваторы, в том числе с роторным рабочим органом. Существующий парк машин отечественного производства и активно внедряемый парк землеройных машин зарубежного производства не в полной мере удовлетворяют современным техническим и экономическими требованиями. Несмотря на то, что в настоящее время создано довольно большое количество типов машин и разнообразных методов, средств механизации и технологий разработки мерзлых грунтов, лишь отдельные из них удовлетворительно применимы при разработке мерзлых грунтов. Эффективное применение и создание современных землеройных машин невозможны без учета физико-механических свойств грунтов и характера взаимодействия их с рабочим органом.

Создавшаяся ситуация обусловила **актуальность** проведения большого объема специальных исследований физико-механических свойств мерзлого грунта и процессов его взаимодействия с рабочим органом, характерных для различных условий залегания, и на этой основе, поиск эффективного пути защиты грунтов Восточно-Сибирского региона от сезонного промерзания.

Отдельные результаты диссертационного исследования получены при выполнении научно-исследовательских работ по заказам научно-исследовательских институтов: «Разработка и исследование системы управления гидрообъемной трансмиссией землеройной машины» (ВНИИЗеммаш, государственный регистрационный номер 81002344), «Разработать классификацию грунтов» (ВНИИСтройдормаш инвентарный номер темы К19123 в рамках целевой государственной программы № 02.05.46) и при выполнении хозяйственных работ с предприятиями строительной отрасли Якутска республики Саха и Красноярска.

Проведенный анализ состояния способов разработки сезонно-мерзлых грунтов и механизации производства работ, основных направлений предохранения грунта от сезонного промерзания позволили сформулировать цель работы.

Цель работы. Повышение эффективности разработки сезонно-мерзлых грунтов роторными траншейными экскаваторами с учетом физико-механических свойств грунтов и их температурных режимов промерзания.

Объект исследований: траншейный экскаватор с роторным рабочим органом.

Предмет исследований: процесс взаимодействия роторного рабочего органа с грунтовым сезонно-мерзлым однородным и неоднородным массивом.

Идея работы – повышение производительности и эффективности разработки мерзлых грунтов путем оптимизации параметров режимов резания в сочетании с предварительной их подготовкой.

Задачи исследования:

1. Оценка физико-механических свойств сезонно-мерзлых грунтов Восточно-Сибирского региона и построение моделей температурных профилей промерзания.

2. Выявление закономерностей формирования составляющей усилия резания от физико-механических свойств и гранулометрического состава мерзлых грунтов, глубины и ширины резания.

3. Оптимизация работы гидромеханического привода рабочего органа с использованием экспериментальных данных о нагрузках, действующих на рабочий орган при разработке однородных мерзлых грунтов и мерзлых грунтов с включениями.

4. Исследование динамических процессов гидромеханического привода рабочего органа роторного экскаватора, взаимодействующего с разрабатываемой средой, на основе математического моделирования.

5. Обосновать выбор параметров траншейных экскаваторов на основе исследования физико-механических свойств и показателя прочности однородных сезонно-мерзлых грунтов и грунтов с включениями.

6. Повышение эффективности работы траншейных экскаваторов за счет уменьшения прочности грунта путем его предварительного утепления полимерными экологически безопасными поропластами на основе экспериментальных данных взаимодействия рабочего органа с мерзлым грунтом.

Методы исследования:

– натурные исследования физико-механических свойств мерзлых грунтов и глубины их промерзания в естественных условиях и условиях их предварительной подготовке к разработке;

– физическое моделирование процесса резания мерзлых грунтов и грунтов с включениями на стенде одиночного и роторного резания, учитывающее процентное содержание включений и характер их распределения;

– математическое и имитационное моделирование динамических процессов взаимодействия гидромеханического привода рабочего органа с разрабатываемой средой;

– натурные исследования физико-механических свойств грунтов, предохраненных от упрочнения при сезонном промерзании.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. Распределение сезонно-мерзлых грунтов Восточно-Сибирского региона по фракционному составу и профилям промерзания является базой данных для оценки эффективности их разработки роторными траншейными экскаваторами.

2. Усилия резания мерзлого грунта существенно зависят от влажности, а их максимальные значения достигаются при граничном значении влажности 17–19 %. Коэффициент вариации сил резания мерзлых грунтов с включениями обратно пропорционален значению глубины и ширины резания.

3. Математическая имитационная модель гидромеханического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора позволяет оценить уровень

динамической мощности, затрачиваемой системой привода на разработку мерзлых грунтов и исследовать статические и динамические характеристики нелинейных системы привода.

4. Критерием оценки работоспособности системы привода рабочих органов траншейных экскаваторов, разрабатывающих мерзлый грунт, является нормированная динамическая мощность, развиваемая гидромеханической системой привода.

5. Методы обоснования и определения оптимальных параметров полимерных поропластов, основанные на учете температурных профилей промерзания грунта для предварительной их подготовки к разработке в зимний период года.

Степень достоверности и обоснованность научных положений, выводов и результатов подтверждается:

– значительным объемом комплексных исследований по изучению характера влияния физико-механических свойств мерзлых грунтов, их гранулометрического состава на характеристики процесса резания, выполненных на полигоне ФГУП СибНИИстройдормаш в течение 14 лет, на карьерах ООО «Мехдорострой» г. Якутска, на строительных площадках ОАО «Домостроительный комбинат» г. Красноярска, при строительстве дорог ООО «ДПМК Ачинская» в Богучанском районе и при производстве вскрышных работ месторождений полезных ископаемых ОАО «СУЭК-КРАСНОЯРСК»;

– соответствием результатов экспериментов на физических моделях по изучению характера влияния гранулометрического состава мерзлых грунтов и геометрических размеров реза на коэффициенты вариации силы резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями и натурного эксперимента;

– совпадением результатов экспериментов по измерению температурных профилей промерзания грунтов с результатами расчетов по регрессионным моделям;

– результатами производственных испытаний метода утепления грунтов поликарбонатным утеплителем до начала производства земляных работ;

Новизна научных положений заключается:

– в установлении закона распределения гранулометрического состава однородных и неоднородных сезонно-мерзлых грунтов, в разработке регрессионных моделей промерзания однородных грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями, установлении значений коэффициентов влияния сроков нанесения карбамидного поропласта относительно начала промерзания грунта для основных видов грунта исследуемого региона;

– в создании критерия оценки прочности мерзлых грунтов как функции числа ударов плотномера ДорНИИ и физико-механических свойств грунта;

– в определении зависимости касательной составляющей силы резания однородных мерзлых грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями от геометрических характеристик рабочего органа, параметров привода и характеристик разрабатываемой среды (влажность, температура, гранулометрический состав и др.);

– в разработке имитационной математической модели системы гидромеханического привода рабочего органа траншейного экскаватора, учитывающей динамические режимы рабочего процесса;

– в создании экологически чистого поликарбонатного поропласта с целью предохранения от упрочнения при промерзании разрабатываемых сезонно-мерзлых грунтов (пат. 2411267РФ, МКИ Композиция для карбамидного пенопласта) и построении температурных профилей промерзания однородных и не однородных утепленных грунтов;

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 05.05.04. – «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины», п. 2 «Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения».

Личный вклад автора состоит в постановке и обосновании цели и задач исследований; в формулировке и разработке всех основных положений, определяющих новизну представленной работы; в разработке и реализации методик экспериментальных исследований, разработке математических моделей и их численной реализации; в проведении натурных и производственных испытаний; во внедрении в производство полученных результатов исследований по разработке мерзлых однородных мерзлых грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

– в разработке номограмм для экспресс-анализа коэффициента прочности однородных грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями;

– в использовании вероятностных методов оценки характеристик грунтов для установления закономерностей распределения сезонно-мерзлых грунтов по фракционному составу, температурным профилям промерзания, процентному содержанию фракций в грунте и значениям коэффициента прочности грунта;

– в создании нового поликарбонатного поропласта, обеспечивающего стабильность нанесенного слоя, теплозащитные свойства, обладающего гидрофобной способностью и новыми прочностными и противопожарными свойствами;

– в разработке методик расчета параметров поликарбонатного пеноутеплителя для предотвращения сезонного промерзания грунтов Восточно-Сибирского региона и оценки эффективности применения землеройной техники с использованием номограммы определения трудности разработки утепленных однородных мерзлых грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями;

– даны рекомендации по расчету температур сезонно-мерзлого и утепленного грунта по глубине залегания для каждого из зимних месяцев с учетом сроков нанесения карбамидного поропласта до начала промерзания грунта;

– в разработке технических условий ТУ 2254-001-02067876-2009 «Поропласты композиционные», паспорта безопасности на поропласт карбамидоформальдегидный РПБ № 58171918-22-29285 от 23 октября 2012 г., а также РТМ (проект) «Мобильный промышленный комплекс по производству в полевых условиях полимерного теплоизоляционного материала и сорбентов» (№ 029-078-2008 Росинформресурс Красноярский Центр научно-технической информации-2008 г.).

Реализация результатов работы. Результаты исследований внедрены в ЗАО «ВНИИСтройдормаш» г. Красноярск, Управлении механизации № 11 ОАО «Домостроительный комбинат» г. Красноярск, ООО «Мехдорстрой» г. Якутск Республика Саха, ООО ДПМК Ачинская, ООО «СУЭК-Красноярск» путем передачи технической документации и методики оценки эффективности применения землеройных машин по номограммам расчета коэффициента трудности разработки сезонно-мерзлых грунтом с гравийно-галечниковыми включениями, методики расчета параметров карбамидного поропласта с учетом температурных профилей для предотвращения грунтов от сезонного промерзания. Разработана и практически применена композиция карбамидного поропласта для предохранения грунтов от сезонного промерзания. На основе результатов выполненной работы разработаны технические условия ТУ 2254-001-02067876-2009 «Поропласты композиционные».

Результаты работы внедрены в учебно-научный процесс Сибирского федерального университета, используются в лекционных курсах, лабораторных и практических занятиях, курсовых и дипломных проектах студентов, диссертационных работах магистрантов и аспирантов.

Технический и экономический эффект от внедрения результатов работы обусловлен снижением коэффициента прочности сезонно-мерзлых грунтов, утепленных композиционным поропластом за счет предохранения от промерзания.

Апробация и публикации. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной конференции Российской научной школы (сентябрь 2003 г.); «Информационные технологии в образовании» (МГТУ МАМИ сентябрь 2004 г.); Международной конференции Российской научной школы «Системные проблемы надежности, качества, информационные технологии» (Москва, 2004 г.); Транспортные средства Сибири (КГТУ, Красноярск 2000–2008 гг.), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Механики – XXI веку Братск 2008 г., 2009 г., 2010 г.); на международных конференциях (Mechanics development issues 2009 Ulaanbaatar Mongolia Интерстроймех–2009, Интерстроймех–2009 НАН КР, Бишкек, Интерстроймех–2009 г. Интерстроймех-2011 Могилев), на расширенном заседании научно-технического семинара кафедры «Механизация путевых, погрузочно-разгрузочных работ» Сибирского государственного университета путей сообщения в мае 2011, ФГБУН Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН в мае 2013, Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М.Ф. Решетнева в июне 2013 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 73 работы, в том числе 2 монографии, 23 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, определенных ВАК Министерством образования РФ, 4 патента, 10 авторских свидетельств СССР, 6 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, заключения и приложений, изложенных на 314 страницах, содержит 146 рисунков, 61 таблицу, список литературы из 180 источников.

Во введении обоснована актуальность проблемы, подтверждающая необходимость развития научных основ прогнозирования эффективности

разработки сезонно-мерзлых грунтов Сибири, сформулирована цель, идея и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна. Подтверждены личный вклад автора, практическая значимость работы и реализация результатов работы в промышленности. Даны сведения об апробации работы и публикациях автора. В заключительной части введения кратко освещено содержание каждого раздела работы.

В первой главе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследования» выполнен анализ опыта разработки сезонно-мерзлых грунтов и проблемы подготовки грунтов к разработке в зимний период года.

Разработке теории рабочих процессов разработки сезонно-мерзлых грунтов посвящены работы по классификации грунтов и трудности разработки М.М. Протодяконова, Р. Юнга, Б.И. Бокия, И. Терцаги, Е.М. Сергеева, Ю.В. Ветрова, Ю.И. Белякова, Н.Г. Домбровского, Д.П. Волкова, И.А. Недорезова, В.Б. Лещинера, В.Г. Басова и др.

При рассмотрении общих вопросов теории разработки мерзлых грунтов, постановке задач исследований использованы труды А.Н. Зеленина, И.А. Недорезова, В.И. Баловнева, Н.Я. Хархуты, Е.М. Кудрявцева, Л.А. Хмары, А.И. Тархова, Н.Н. Карнаухова, Л.Л. Барона, Г.В. Родионова, А.И. Федулова, А.Р. Маттиса, И.К. Растегаева, Л.К. Соколова, В.Г. Жубрина, Б.В. Осипенко и др.

Исследованию работоспособности систем гидравлического привода строительных машин и вопросам его моделирования посвящены работы Т.М. Башта, В.Е. Вильсона, М.М. Гайцгори, Д.В. Драгомирова, С.П. Ереско, Л.Б. Зарецкого, С.В. Каверзина, Е.С. Кисточкина, Е.Ю. Малиновского, В.В. Мишке, В.Н. Прокофьева, А.И. Тархова и др.

При анализе способов предохранения грунтов от упрочнения при сезонном промерзании использованы труды М.Н. Григорьева, Н.Г. Шплета, Х. Баумана, Л.А. Поповой, Б.А. Елизарова, СибНИИпроектцемента, ВНИИГа им. Б.Е. Веденеева, СибНИИГиМ и Института теплофизики СО РАН.

Рассмотрение состояния вопроса (выполненных исследований) с точки зрения интенсификации процесса разработки сезонно-мерзлых грунтов показало:

1. Целесообразность оценки физико-механических свойств сезонно-мерзлых грунтов и показателей, влияющих на их прочность.

2. Необходимость установления влияния физико-механических свойств мерзлых грунтов и их гранулометрического состава на режимы резания и обоснования критерия оценки прочности грунтов.

3. Учет влияния динамических процессов резания грунта на характеристики гидромеханического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора.

4. Целесообразность выбора типоразмера роторного траншейного экскаватора с учетом свойств однородных и неоднородных мерзлых грунтов.

5. Необходимость создания композиций, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики порошковых слоев для предварительной подготовки грунта к разработке.

В результате проведенного анализа выполненных работ определены основные направления исследований в области интенсификации процесса разработки сезонно-мерзлых грунтов, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава «Физико-механические свойства мерзлых грунтов Восточной Сибири» содержит обзор комплекса физико-механических характеристик грунтов, влияющих на эффективность разработки землеройно-транспортными машинами, в ней приведены результаты исследования физико-механических характеристик однородных мерзлых грунтов и мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

Выявленные закономерности распределения фракционного состава включений в сезонно-мерзлых грунтах применимы для исследования влияния физико-механических характеристик сезонно-мерзлого грунта на формирование усилий резания. Приведены результаты исследования влияния геометрических параметров инструмента и режимов на усилие резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

Для исследования процесса резания мерзлых грунтов проведены стендовые и натурные исследования сил резания мерзлых грунтов от угла и скорости резания, глубины, ширины и прочности грунта, получены коэффициенты вариации силы резания в зависимости от размеров среза, исследовано влияние шага, глубины, скорости резания и геометрических параметров реза.

В третьей главе «Исследование динамических режимов работы гидромеханической системы привода траншейного экскаватора» разработаны полная и упрощенная имитационные модели привода рабочих органов траншейных экскаваторов, проведены исследования динамических процессов при воздействии спектра нагрузок на рабочий орган. В главе проанализированы основные положения и выводы из работ российских и зарубежных ученых, в которых рассмотрены вопросы математического моделирования гидравлических систем. Сложность моделирования потерь в объемно-роторных гидромашинах отмечается практически во всех работах этого направления.

Для исследования динамических режимов гидромеханической трансмиссии привода рабочего органа траншейных экскаваторов разработана имитационная модель с использованием Matlab (Simulink), учитывающая влияние сил резания сезонно-мерзлых однородных грунтов и грунтов с включениями, оценивающая режим автоколебаний давления рабочей жидкости и изменения параметров гидропривода рабочего органа (рис. 1).

Разработанная математическая модель применена для исследования статических и динамических характеристик системы гидропривода с регулируемой фазой рабочих процессов высокомоментного гидромотора, что позволяет снижать пульсации давлений в напорных магистралях гидропривода вращения ротора.

Четвертая глава «Комплексный показатель прочности мерзлых грунтов Восточно-Сибирского региона» содержит результаты теоретических исследований в области формирования показателя прочности сезонно-мерзлых грунтов и соответствия каждого из существующих типоразмеров землеройно-транспортных машин условиям применения на конкретных типах грунтов, мето-

ды оценки эффективности применения экскаваторов при разработке мерзлых грунтов.

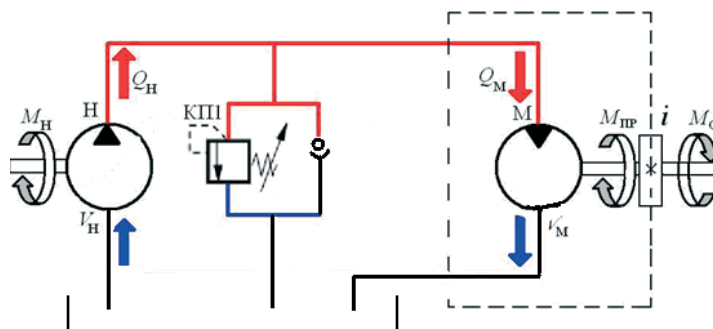


Рисунок 1. Расчетная схема гидравлического привода роторного траншейного экскаватора

В пятой главе «Теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию эксплуатационных свойств поропластов для предохранения грунтов от упрочнения при сезонном промерзании» представлены эксплуатационные свойства и результаты исследования повышения прочности карбамидных поропластов при изменении массовой доли наполнителей, кратности вспенивания, плотности от вида наполнителей, изменения теплопроводности от влажности.

В шестой главе «Результаты экспериментальных исследований характеристик утепленных грунтов» рассмотрены вопросы предохранения от упрочнения грунтового массива, обосновано целесообразность предохранения грунта от промерзания с использованием карбамидных поропластов в условиях Восточно-Сибирского региона. Приведены результаты экспериментальных исследований изменения температуры утепленных различного гранулометрического состава грунтов, исследовано влияние сроков нанесения на толщину слоя поропласта, показано, что введение в карбамидный поропласт экстрактов коры хвойных пород, содержащих таннины и полифенолы, золу-унос, получаемой от сжигания углей и содержащей оксиды железа, алюминия, кальция, магния понижает токсичность и горючесть карбамидного поропласта за счет химического взаимодействия формальдегида с полифенолами одновременно способствуя повышению прочностных характеристик поропластов.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Установлено распределение гранулометрического состава однородных и неоднородных сезонно-мерзлых грунтов, разработаны регрессионные модели промерзания однородных грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями.

Для оценки грунтовых условий по температурным режимам промерзания грунтов выделены три расчетных случая нахождения зоны разработки в мерзлом состоянии, установлена вероятность распределения отрицательных температур и прочности грунта по зонам Восточной Сибири (табл. 1).

**Вероятность распределения отрицательных температур
и прочности мерзлых грунтов Восточной Сибири**

Наименование исследуемой зоны	Температурный режим	Распределение отрицательных температур (t) по глубине (H)	Распределение прочности грунта (C) по глубине (H)
Красноярский край, Северная зона	T_2	$t = -5,9 + 8,7H - 2,8H^2$	$C = 228 - 201H$
	T_3	$t = -10,8 + 10,5H - 2,6H^2$	$C = 276 - 119H$
	T_4	$t = -9,7 + 7,6H - 1,6H^2$	$C = 232 - 48H$
Республика Саха	T_4	$t = -12,5 + 10,1H - 2,1H^2$	$C = 277 - 57H$
Республика Бурятия	T_2	$t = -8,1 + 16,3H - 7,7H^2$	$C = 236 - 256H$
Иркутская область	T_2	$t = -8,7 + 18,1H - 8,5H^2$	$C = 268 - 322H$
	T_3	$t = -5,2 + 5,7H - 1,4H^2$	$C = 208 - 134H$
БАМ	T_2	$t = -6,3 + 8,9H - 3,2H^2$	$C = 235 - 198H$
	T_3	$t = -12,9 + 10,7H - 2,2H^2$	$C = 377 - 105H$
	T_4	$t = -1,5 + 11,3H - 1,8H^2$	$C = 285 - 65H$

Анализ приведенных распределений показывает, что наиболее неблагоприятные условия по температурным режимам промерзания наблюдаются в зоне БАМа, на севере Красноярского края и в республике Саха.

Обобщение справочных данных за двадцатилетний период, проведение дополнительных исследований распределения влажности в грунтах Сибири с последующей обработкой вариационных рядов распределения усредненных значений влажности наиболее перспективных с точки зрения вероятности их разработки приведено в табл. 2.

В работе установлены вероятности распределения фракционного состава включений в грунтах исследуемого региона, в качестве примера приведены распределения фракционного состава включений, полученные для территории БАМа (рис. 2), северной и южной зоны Красноярского края (рис. 3).

Таблица 2

Параметры функции плотности распределения вероятностей разработки мерзлых грунтов Восточной Сибири с различными значениями влажности

Наименование территории	Глубина залегания грунта, м								
	<1,5			1,5–3,0			>3,0		
	Влажность грунта, %								
	≤ 15			15–25			≥ 25		
	Вероятность, параметры функции плотностей распределения								
	p	m	σ	p	m	σ	p	M	σ
Красноярский край	0,253	20,20	7,76	0,475	16,73	7,15	0,271	8,65	5,45
Иркутская область	0,298	18,94	7,43	0,495	19,30	7,25	0,207	19,33	8,26
Республика Саха	0,391	17,23	8,06	0,442	18,62	7,22	0,167	21,79	8,32
Республика Бурятия	0,918	8,74	4,50	0,082	8,55	4,72	0,126	4,76	7,89

Грунты зоны БАМа многофракционны по своему составу, наиболее вероятными являются каменистые включения 3,4,5 и 6 фракций, вероятность включений

размером от 30 до 70 мм, составляет 0,9, от 70 до 100 мм и от 100 до 200 мм составляет 0,1.

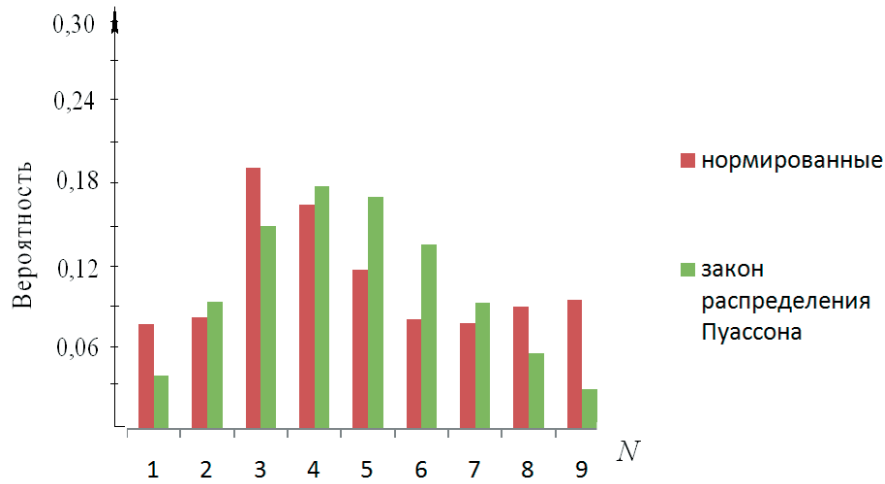


Рисунок 2. Вероятность распределения фракционного состава включений в грунтах территории БАМ

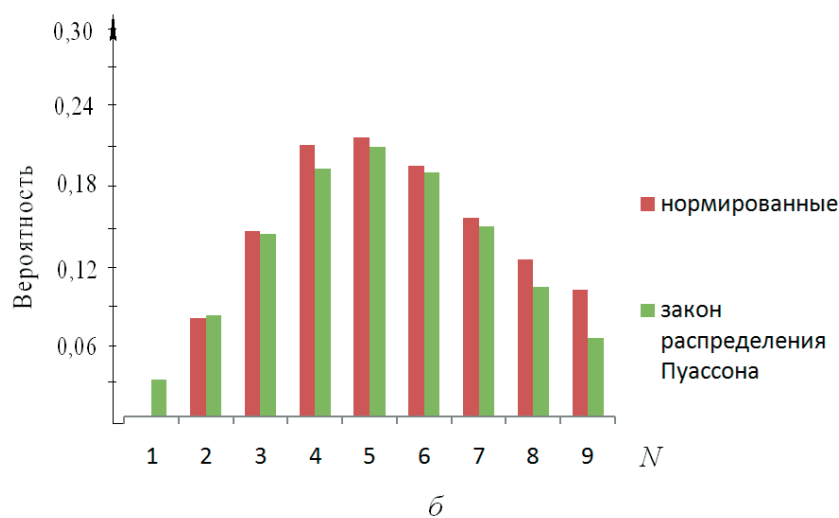
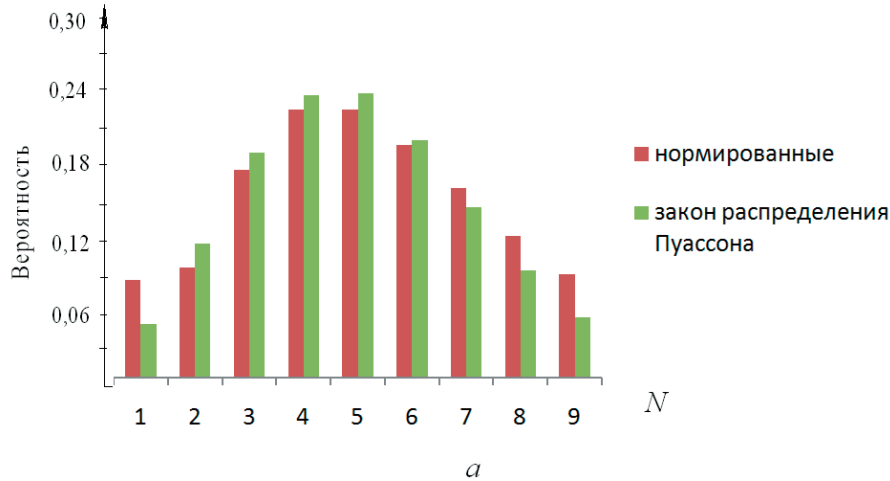


Рисунок 3. Вероятность распределения фракционного состава фракций в грунтах Красноярского края: а – северная зона; б – южная зона; 1 – вероятность наличия отдельных фракций гравийно-галечниковых включений

Грунты северной зоны Красноярского края содержат каменистые включения размером 0,1–0,5 мм, вероятность наличия в грунтах включений данного размера составляет 0,17; включения размером от 0,5 до 2 мм и от 2 до 10 мм имеют вероятность 0,23; каменистые включения размером от 10 до 30 мм также представительны и имеют вероятность 0,19; включения от 30 до 70 мм имеют вероятность 0,17; вероятность включений размером от 70 до 100 мм равна 0,12; а включения размером более 100 мм имеют вероятность 0,09.

В грунтах южной зоны Красноярского края вероятность встречаемости всех фракций, кроме девятой меньше чем в грунтах северной территории, а вероятность 9 фракции включений составляет 0,105.

Число фракций в грунте может колебаться в очень широком диапазоне – до десяти фракций. На рис. 4 показаны изменения частоты встречаемости фракций в составах грунта, полученные для северной и южной зоны Красноярского края.

Аналогичные распределения частоты встречаемости фракций получены для грунтов республики Саха, Бурятия, Иркутской области и территории БАМ.

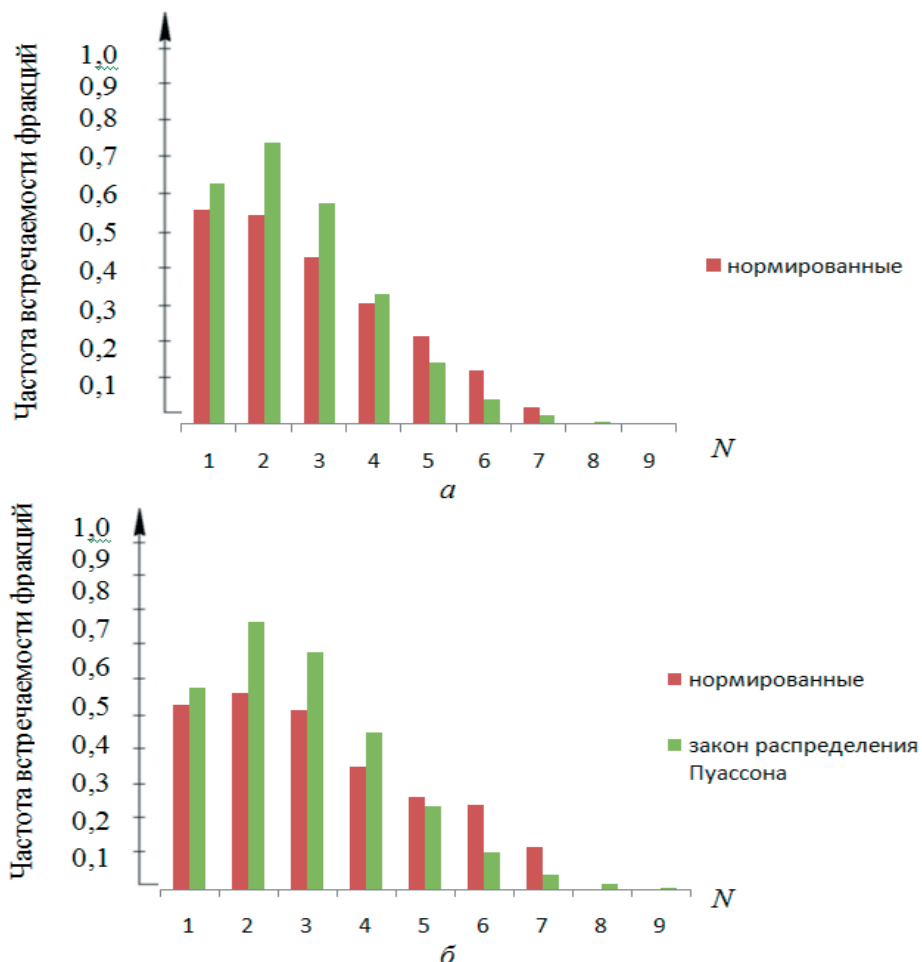


Рисунок 4. Частота встречаемости фракций в грунтах Красноярского края: а – северная зона; б – южная зона

Республика Бурятия и Иркутская область (рис. 5) имеют свою специфику, в частности, в Иркутской области преобладают грунты с включениями первой

и второй фракциями частота их встречаемости равна 0,3, грунтов с третьей фракцией – 0,24, четвертая фракция имеет частоту встречаемости – 0,07, пятая, шестая и седьмая фракция имеют частоту встречаемости 0,04.

Вероятность встречаемости в грунтах республики Бурятия первой фракции 0,35, второй и пятой фракций 0,48, третьей фракции – 0,92, четвертой фракции – 0,76, а шестой фракции достигает 0,26, седьмая, восьмая и девятая фракции включений имеют вероятность встречаемости 0,4, 0,38 и 0,37.

По числу фракций грунты Республики Бурятии неоднородны по своему составу; первая и третья фракции включений в грунтах имеет частоту встречаемости 0,28; вторая фракция имеет частоту встречаемости 0,3; четвертая – и пятая фракция имеют частоту встречаемости 0,2 и 0,1 соответственно.

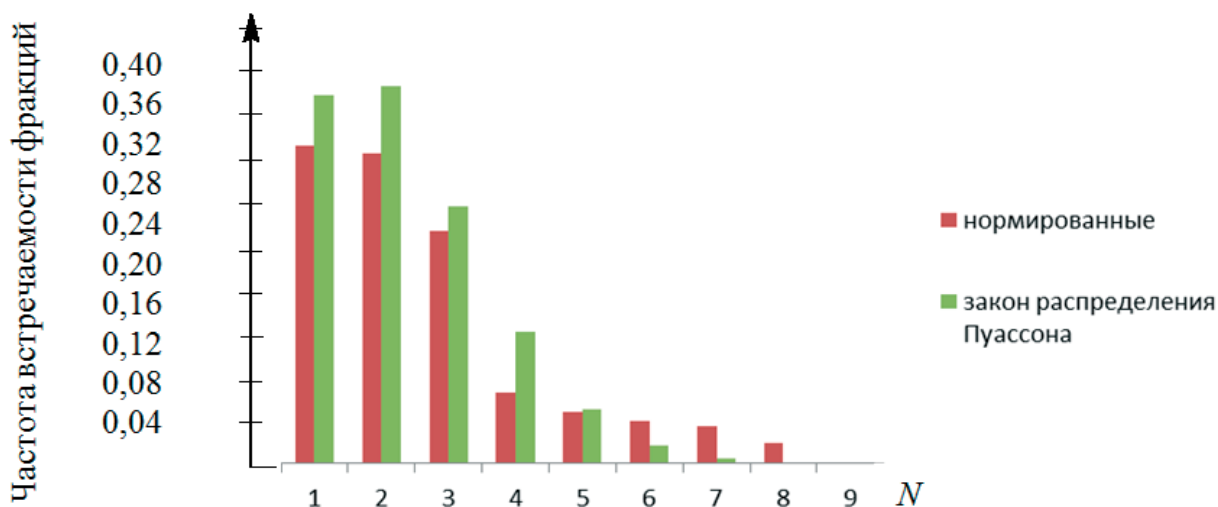


Рисунок 5. Частота встречаемости числа фракций гравийно-галечниковых включений в грунтах Иркутской области

Наибольшее количество фракций характерно для грунтовых условий БАМа, число фракций здесь составляет семь, наибольшую частоту встречаемости имеют первая, вторая и третья фракции (частота встречаемости 0,7), частота четвертой фракции равна 0,35, пятой фракции включения в составе грунта 0,27, шестой фракций составляет 0,25, седьмой фракции – 0,15.

Результаты подтверждают аксиому о преимущественном распространении суглинистых и супесчаных грунтов на территории Сибири и позволяет сделать предположение, что фракционный состав гравийно-галечниковых включений по фракционному составу в разрабатываемых грунтах подчиняется закону распределения Пуассона.

$$P(x) = e^{-\xi} \frac{\xi^x}{x!},$$

где $P(x)$ – плотность вероятности; ξ – математическое ожидание; $x!$ – степень свободы.

Для проверки этой гипотезы использовался критерий согласия Пирсона χ^2 .

$$Y = n \sum_i \frac{(h_i - p_i)^2}{p_i},$$

где n – количество наблюдений; h_i – относительная частота встречаемости фракции; p_i – гипотетическая вероятность.

Вместе с тем наблюдается образование двух кластеров, разделенных по параметру распределения и уровню значимости гипотезы.

2. Определены зависимости силы резания однородных мерзлых грунтов и грунтов с гравийно-галечниковыми включениями от геометрических характеристик рабочего органа, параметров привода и характеристик разрабатываемой среды (влажность, температура, гранулометрический состав и др.).

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить следующие расчетные зависимости для определения усилия резания при ступенчато-шахматной схеме расположения резцов на рабочем органе:

для резцов в крайних линиях резания

$$P'_k = 0,982 + 0,2113 \left(\frac{t-b}{h} \right) P_k;$$

для резцов в средних линиях резания

$$P'_k = 0,516 + 0,2622 \left(\frac{t-b}{h} \right) P_k.$$

Здесь P_k – усилие заблокированного резания.

Математическая обработка результатов исследований на стенде позволила получить следующие коэффициенты, учитывающие влияние скорости K'_V и угла резания K'_α на касательную составляющую усилия резания при ступенчато-шахматной схеме расстановки резцов на рабочем органе:

для средних резцов

$$K_V = K'_V \left(0,98 + 0,023 \frac{t-b}{h} \right);$$

для крайних резцов

$$K_V = K'_V \left(0,99 + 0,031 \frac{t-b}{h} \right),$$

где K'_V – коэффициент, учитывающий изменение усилия заблокированного резания от скорости резания;

для средних резцов

$$K_\alpha = K'_\alpha \left(0,98 + 0,03 \frac{t-b}{h} \right);$$

для крайних резцов

$$K_{\alpha} = K'_{\alpha} \left(1 + 0,033 \frac{t-b}{h} \right),$$

где K'_{α} – коэффициент, учитывающий изменение усилия заблокированного резания от угла резания; t – шаг расстановки резцов; b – ширина резца; h – подачи глубина резания. Влияние процентного содержания гравийно-галечниковых включений на коэффициент корреляции усилия резания мерзлых грунтов учитывается коэффициентом K_{ξ} :

$$K_{\xi} = -6,302 \cdot 10^{-8} \cdot \xi^4 + 1,166 \cdot 10^{-5} \cdot \xi^3 - 0,001 \cdot \xi^2 + 0,054 \cdot \xi + 0,036,$$

где ξ – процентное содержание гравийно-галечниковых включений.

Весь спектр нагрузок, действующих на рабочие органы роторных траншейных экскаваторов при разработке мерзлых грунтов с включениями, формализован тремя расчетным случаем:

- множественные включения различного размера

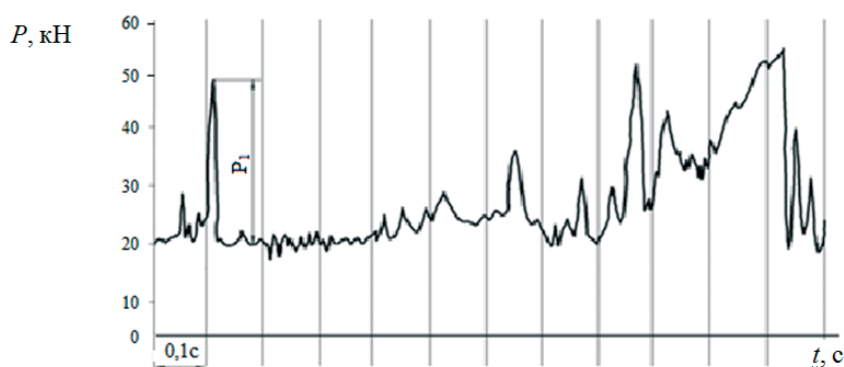


Рисунок 6. Осциллограмма нагрузок при разработке мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями резцом шириной 18 мм

- единичные массивные включения

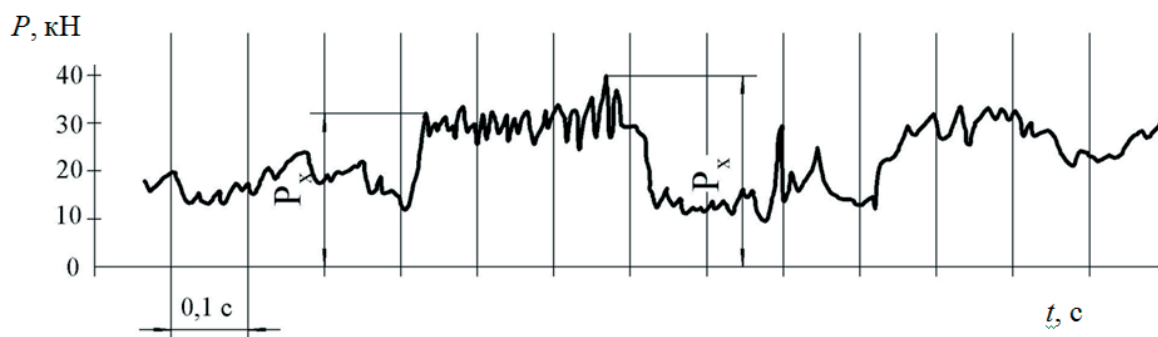


Рисунок 7. Осциллограмма нагрузок, возникающих на резце при разрезании включения в среде мерзлого суглинка и глины

- единичные мелкие включения

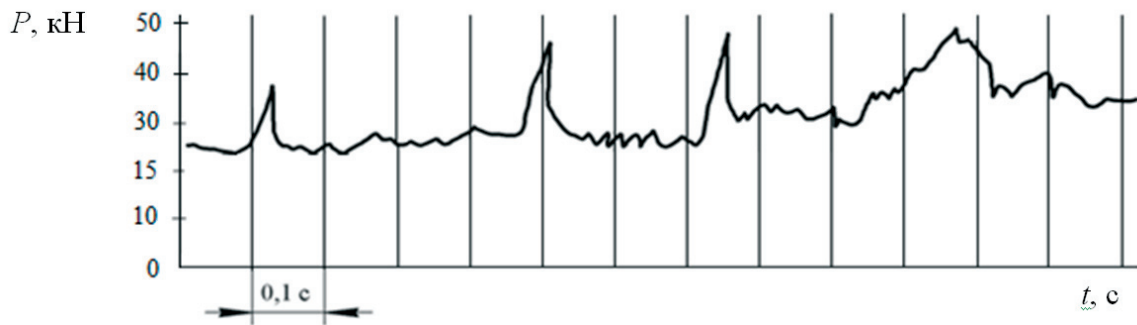


Рисунок 8. Оциллограмма нагрузок, возникающих на резце при разрезании включения в среде

Таким образом, результаты исследований устанавливают влияние геометрических параметров рабочего органа, режимов резания для однородных и неоднородных грунтов на закономерности формирования нагрузок. Это позволяет определить показатели работы гидромеханического привода роторного траншейного экскаватора.

3. Разработана математическая имитационная модель гидромеханического привода рабочих органов роторных траншейных экскаваторов, работающих в динамических режимах, позволяющая оценить уровень динамической мощности, затрачиваемой системой привода на разработку мерзлых грунтов.

Математическая модель гидравлического привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора состоит из уравнений состояния (1)–(5), уравнений связи (6) и (7) и ограничений на перемещения обратного (8) и предохранительного клапанов (9) и учитывающая модуль упругости гидравлических линий (10, 11).

Уравнения состояния

Давление рабочей жидкости в гидросистеме

$$\frac{dP_H(t)}{dt} = -A_4 \cdot P_H(t) + A_3 \cdot Q_{OK}(X_{OK}(t)) - A_3 \cdot Q_{ПК}(X_{ПК}(t)) - A_2 \cdot \omega_{ГМ}(t) + A_1 \cdot q_M; \quad (1)$$

$$A_1 = \frac{\omega_{ДВ}}{K_{упр} \cdot i_{пр}}; \quad A_2 = \frac{q_M}{K_{упр}}; \quad A_3 = 1/K_{упр}; \quad A_4 = \frac{K_p}{K_{упр}}.$$

Смещение обратного клапана в функции давления

$$\frac{dX_{OK}(t)}{dt} = A_5 \cdot \int_0^t (P_H(t) - P_{OK}) dt - A_6 \cdot \int_0^t \frac{Q_{OK}^2(t)}{X_{OK}(t)} dt - A_7 \cdot X_{OK}(t) - A_8 \int_0^t X_{OK}(t) dt; \quad (2)$$

$$A_5 = \frac{S_{OK}}{M_{OK}}; \quad A_6 = \frac{B_{OK}}{M_{OK}}; \quad A_7 = \frac{h_{OK}}{M_{OK}}; \quad A_8 = \frac{C_{OK}}{M_{OK}}.$$

Смещение предохранительного клапана в функции давления

$$\frac{dX_{\text{пк}}(t)}{dt} = A_9 \cdot \int_0^t (P_{\text{н}}(t) - P_{\text{пк}}) dt - A_{10} \cdot \int_0^t \frac{Q_{\text{пк}}^2(t)}{X_{\text{пк}}(t)} dt - A_{11} \cdot X_{\text{пк}}(t) - A_{12} \int_0^t X_{\text{пк}}(t) dt; \quad (3)$$

$$A_9 = \frac{S_{\text{пк}}}{M_{\text{пк}}}; \quad A_{10} = \frac{A_{\text{пк}}}{M_{\text{пк}}}; \quad A_{11} = \frac{h_{\text{пк}}}{M_{\text{пк}}}; \quad A_{12} = \frac{C_{\text{пк}}}{M_{\text{пк}}}.$$

Скорость вращения вала гидромотора в функции давления

$$\frac{d\omega_{\text{гм}}(t)}{dt} = (A_{13} - A_{15})(P_{\text{н}}(t) - P_{\text{с}}) - A_{14} \cdot \omega_{\text{гм}}(t) - A_{16} \times$$

$$\times \left(\int_0^t \omega_{\text{гм}}(t) dt - A_{17} \int_0^t \omega_{\text{по}}(t) dt \right); \quad (4)$$

$$A_{13} = \frac{q_{\text{м}}}{J_{\text{гм}}}; \quad A_{14} = \frac{k_{\text{гм}}}{J_{\text{гм}}}; \quad A_{15} = \frac{b_1}{J_{\text{гм}}}; \quad A_{16} = \frac{C_{21}}{i_{\text{по}} \cdot J_{\text{гм}}}; \quad A_{17} = i_{\text{по}}.$$

Скорость вращения вала привода рабочего органа в функции скорости вращения вала гидромотора и действующих нагрузок (моментов – M_1, M_2, M_3) сопротивления, являющихся функцией физико-механических свойств разрабатываемого грунта

$$\frac{d\omega_{\text{по}}(t)}{dt} = A_{18} \cdot \left(\int_0^t \omega_{\text{гм}}(t) dt - A_{19} \cdot \int_0^t \omega_{\text{по}}(t) dt \right) - A_{20} \cdot \omega_{\text{по}}(t) - A_{21} \cdot M_{\text{н}}(t). \quad (5)$$

$$A_{18} = \frac{C_{22}}{J_{\text{по}}}; \quad A_{19} = \frac{i_{\text{по}}}{J_{\text{по}}}; \quad A_{20} = \frac{K_{\text{н}}}{i_{\text{пр}} \cdot J_{\text{по}}}; \quad A_{21} = \frac{1}{i_{\text{пр}} \cdot J_{\text{по}}}.$$

Уравнения связи

Расход гидравлической жидкости через обратный клапан, зависящий от давления рабочей жидкости $P_{\text{н}}$ и давления насоса подпитки $P_{\text{нп}}(\text{const})$.

Если $P_{\text{нп}} < P_{\text{н}}$, то $Q_{\text{ок}} = 0$.

$$\text{Если } P_{\text{нп}} > P_{\text{н}}, \text{ то } Q_{\text{ок}} = B \cdot x_{\text{ок}} \cdot \sqrt{(P_{\text{нп}} - P_{\text{н}})}. \quad (6)$$

Расход гидравлической жидкости через предохранительный клапан, зависящий от давления рабочей жидкости $P_{\text{н}}$ и давления настройки клапана предохранительного $P_{\text{пк}}(\text{const})$

Если $p_{\text{н}} \leq p_{\text{пк}}$, то $Q_{\text{пк}} = 0$.

$$\text{Если } p_{\text{н}} > p_{\text{пк}}, \text{ то } Q_{\text{пк}} = A \cdot x_{\text{пк}} \cdot \sqrt{(P_{\text{н}} - P_{\text{пк}})}. \quad (7)$$

Ограничения.

$$0 \leq X_{\text{ок}}(t) \leq 1,5 \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

$$0 \leq X_{\text{пк}}(t) \leq 1,5 \cdot 10^{-3}. \quad (9)$$

Модуль упругости гидравлических трубопроводов

$$K_{\text{упр. тр}} = \pi \cdot \ell \left(\frac{1-\mu}{8} \cdot \frac{d^3}{E_T \delta} + \frac{d^2}{4E_{\text{ж}}} \right); \quad K_{\text{упр. п}} = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4E_p} \ell_p; \quad (10)$$

$$E_p = \frac{E_{\text{ж}} \cdot E_{\text{тр}}}{E_{\text{ж}} + E_{\text{тр}} \frac{d_{\text{тр}}}{c_{\Sigma} \delta_{\text{тр}}}}; \quad c_{\Sigma} = \left(\mu + \frac{r_1^2 + r_2^2}{r_1^2 + r_2^2} \right). \quad (11)$$

Момент резания грунта, зависящий от силы резания P'_K

$$M_1 = (P'_K) \cdot R_r.$$

Сила резания грунта с включениями, зависящая от физико-механических свойств грунта C , толщины стружки h , ширины резца b , скорости резания V_p , шага расстановки резцов t , размера включений ζ (табл. 3) и коэффициента блокированности μ , может быть формализована одной из осциллограмм (рис. 6, 7, 8) или определена из зависимости.

$$P'_K = P_k \cdot K'_V \cdot K'_\alpha \cdot K'_\zeta \cdot \mu;$$

$$P_k = 8,32(-0,283 + 0,149 \cdot 10^{-1} C - 0,221 \cdot 10^{-4} C^2) \times$$

$$\times (-0,419 \cdot 10^{-1} + 0,75 \cdot 10^{-1} h - 0,54 \cdot 10^{-3} h^2) \times$$

$$\times (0,178 \cdot 10^{-2} + 0,06b - 0,67 \cdot 10^{-3} b^2) \cdot 10^2;$$

$$K'_V = (0,9244 + 0,063V_p) \left(0,98 + 0,023 \frac{t-b}{h} \right);$$

$$K'_\alpha = (0,456 + 0,068\alpha) \left(0,98 + 0,03 \frac{t-b}{h} \right).$$

$$K'_\zeta = 0,1033 + 39,18\zeta - 0,00043n^2,$$

где $J_{\text{ро}}$, $J_{\text{ГМ}}$, $J_{\text{ж}}$ – моменты инерции рабочего органа, гидромотора, рабочей жидкости в гидролиниях; $\omega_{\text{ГМ}}$ – частота вращения выходного вала гидромотора; $M_{\text{н}}$, – моменты привода насоса; $p_{\text{н}}$ – давление жидкости в напорной магистрали; $Q_{\text{н}}$, $Q_{\text{ГМ}}$, $Q_{\text{ПК}}$, $Q_{\text{ОК}}$ – расходы гидравлической жидкости насоса, гидромотора, предохранительного и обратного клапанов; E – эквивалентный модуль упругости системы «жидкость – стенка трубопровода»; $E_{\text{ж}}$, $E_{\text{тр}}$ – модули упругости рабочей жидкости и трубопровода; $d_{\text{тр}}$ – внутренний диаметр трубопровода; c_{Σ} – жесткость трубопровода; $\delta_{\text{тр}}$ – толщина стенки трубопровода; μ – модуль упругости материала трубопровода; r_1 , r_2 – внутренний и внешний радиусы трубопровода; $P_{\text{ки}}$ – позиционная составляющая нагрузки резания мерзлого грунта; λ_1 , λ_2 – гидравлические сопротивления напорной и сливной гидролиний; M_G – момент сопротивления от веса грунта в ковше; i , $i_{\text{ро}}$ – передаточные числа редуктора привода насоса, привода ротора; $x_{\text{ок}}$, $x_{\text{ПК}}$ – перемещения рабочего элемента обратного и предохранительного клапанов; $S_{\text{ок}}$, $S_{\text{ПК}}$ – эффективные площади рабочих элементов предохранительного и обратного клапанов; $M_{\text{ПК}}$, $M_{\text{ок}}$ – масса рабочего

элемента обратного и предохранительного клапанов; $C_{ок}, C_{пк}$ – жесткости пружины обратного и предохранительного клапанов; $p_{ок}, p_{пк}$ – давление срабатывания обратного и предохранительного клапанов; $B_{ок}, A_{пк}$ – коэффициент гидродинамической силы обратного и предохранительных клапанов; $\eta_{гп}$ – общий коэффициент полезного действия системы гидропривода.

Таблица 3

**Фракционный состав гравийно-галечниковых включений
сезонно-мерзлых грунтов**

Размер частиц (ζ) · 10 ⁻³ м	0,1	0,1–2	2–8	8–30	30–50	50–90
Состав частиц (n), %	28–32	20–24	16–18	16–18	9–11	3–5

Уравнения состояния содержат нагрузки, воздействующие со стороны разрабатываемой среды – мерзлых грунтов. По результатам обработки большого объема осциллограмм экспериментальных исследований процесса резания сезонно-мерзлых грунтов произведена аппроксимация нагрузок воздействующих на рабочие органы траншейных экскаваторов. На рис. 6, 7, 8 приведены указанные нагрузки $P_k(t)$, которым для удобства их использования в уравнениях состояния системы привода присвоены названия – нагрузки первого, второго и третьего типа.

Из условия реализации процесса резания мерзлых грунтов необходимый момент на валу гидромотора в уравнениях состояния привода ротора принят:

$$M_p(t) > M_{mc}(t) \cdot K_n + M_c(t), \quad (12)$$

где $M_{mc}(t)$ – математическое ожидание момента на режущих зубьях ротора, зависящий от глубины резания грунта; K_n – коэффициент, зависящий от количества одновременно контактирующих с грунтом зубьев; M_c – момент сопротивления, учитывающий вариацию гравийно-галечниковых включений и физико-механических свойств сезонно-мерзлого грунта.

Момент сопротивления резания сезонно-мерзлого грунта, учитывающий вариацию гравийно-галечниковых включений и физико-механических свойств грунта

$$M_c = P_k \cdot R_r,$$

где P_k – усилие резания грунта на зубьях ротора; R_r – радиус установки зубьев относительно вала привода ротора.

Надежность математической модели зависит от количества и значений вводимых эмпирических констант, а также зависимостей, обусловленных типоразмером роторного траншейного экскаватора, а также существенно связанных с режимами работы их привода.

Для реализации уравнений состояния в Matlab (Simulink) разработана имитационная модель гидропривода, соответствующая приведенной выше системе уравнений и дающая наглядное представление о взаимосвязи физических процессов, имеющих место при функционировании систем объемного гидропривода (рис. 9).

Выходными параметрами динамической модели определены следующие переменные: $\omega_{ГМ}$ – угловая скорость вращения вала гидромотора, $\omega_{рo}$ – угловая скорость вращения вала рабочего органа, давление жидкости в напорной магистрали и NAGRUZKA, одноименное название имеет внутренняя подсистема, которая формирует временную диаграмму возможной нагрузки траншейного экскаватора.

Компоненты правой части четвертого уравнения состояния поступают на вход сумматора S_{gm} .

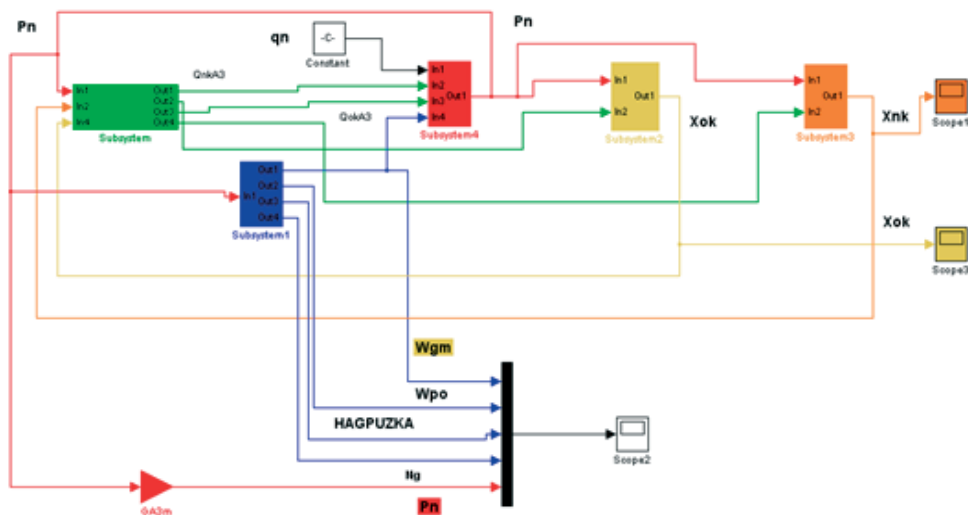


Рисунок 9. Структурная схема имитационной динамической модели гидрообъемной трансмиссии подсистемы привода рабочего органа траншейного экскаватора

Коэффициенты A_{13} , A_{14} , A_{15} , A_{16} имитируются одноименными усилителями GA13–GA16. Выход этого сумматора представляет правую часть уравнения $d\omega_{ГМ}(t)/dt$ – угловое ускорение вращения вала гидромотора. Эта переменная обрабатывается интегрирующим звеном 7.

4. Критерием оценки работоспособности системы привода рабочих органов траншейных экскаваторов, разрабатывающих мерзлый грунт, является нормированная динамическая мощность, развиваемая гидромеханической системой привода.

Существующие критерии оценки работоспособности динамических нелинейных систем привода трудно применимы для оценки динамических процессов гидромеханических систем привода рабочих органов траншейных экскаваторов, взаимодействующих с мерзлым грунтом. Поэтому лучшей демонстрацией нахождения системы в работоспособном состоянии является характер изменения выходного управляемого сигнала. В качестве комплексного критерия предложена величина нормированного динамического момента привода рабочих органов землеройно-транспортных машин.

Момент $M(t)$, развиваемый радиально-поршневым гидромотором, согласно теории привода, при постоянстве приведенного к валу момента инерции $J_{пр}$, может быть представлен в виде суммы суммарного приведенного к валу статического момента $M_{ср}(t)$ и динамической составляющей $J_{пр} \cdot \frac{d\omega_{ГМ}(t)}{dt}$, пропорциональной ускорению вала гидромотора.

Эту составляющую назовем динамическим моментом $M(t) = J_{\text{пр}} \frac{d\omega_{\text{гм}}(t)}{dt}$. Динамический момент привода, таким образом, полностью определяется изменениями скорости $\frac{d\omega_{\text{гм}}(t)}{dt}$. Так, при изменениях скорости, вызванных изменениями нагрузки на рабочем органе, разрабатывающем мерзлый грунт, этот динамический момент полностью отвечает на изменения $M_c(t)$ и отображает их влияние на работоспособность системы привода.

Динамический момент определяется из уравнения:

$$J_{\text{пр}} \cdot \frac{d\omega_{\text{гм}}(t)}{dt} = M_{\text{гм}}(t) + M_c(t). \quad (13)$$

где $\omega_{\text{гм}}(t)$ – угловая скорость вала высокомоментного гидромотора привода рабочего органа; $M_{\text{гм}}(t)$ и $M_c(t)$ – моменты на валу гидромотора и моменты сопротивления со стороны разрабатываемого грунта, приведенные к валу высокомоментного гидромотора; $J_{\text{пр}}$ – приведенный к валу гидромотора момент инерции рабочего органа.

Величина динамического момента привода рабочего органа позволяет получить значение мгновенной мощности:

$$P_{\text{пр}}(t) = \left(J_{\text{пр}} \cdot \frac{dw(t)}{dt} + M_c(t) \right) \cdot w(t). \quad (14)$$

Исследования имитационной динамической модели гидрообъемной трансмиссии подсистемы привода рабочего органа траншейного экскаватора позволили получить диаграммы изменения значений динамического момента и мгновенной мощности (рис. 10) при воздействии на систему привода рабочего органа траншейного экскаватора всех формализованных видов нагрузки при разработке сезонно-мерзлых грунтов.

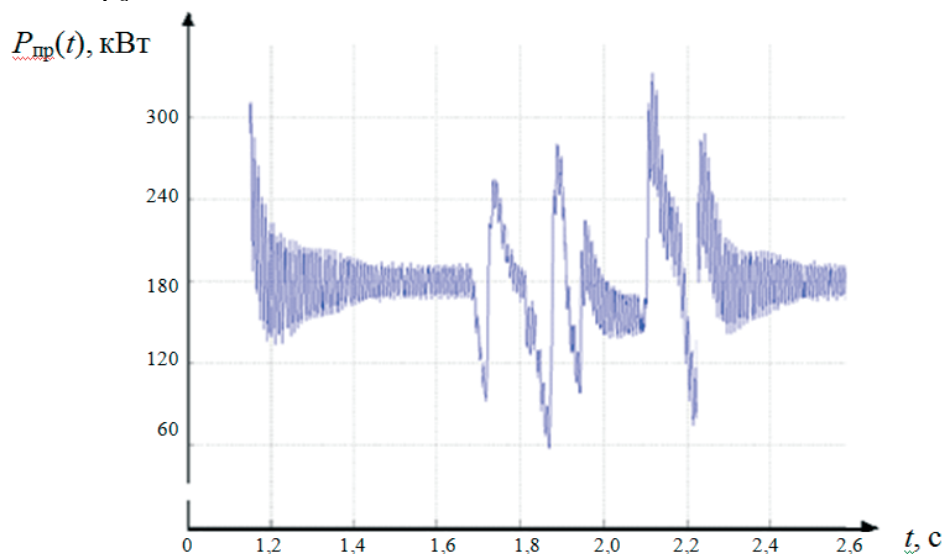


Рисунок 10. Изменение динамической мощности гидропривода рабочего органа при воздействии нагрузок первого типа (фрагмент осциллограммы, начальное время подключения нагрузки $t = 1$ с)

Изменение параметров гидромеханического привода рабочего органа на примере воздействия нагрузок третьего типа приведено на рис. 11.

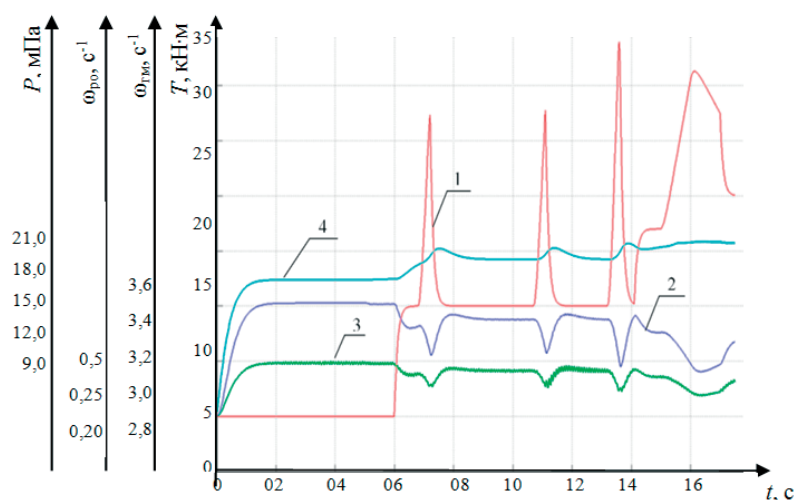


Рисунок 11. Изменение параметров привода при воздействии нагрузок третьего типа на привод рабочего органа (начальное время подключения нагрузки $t = 0,55$ с):

1 – осциллограмма нагрузки; 2 – угловая скорость вала гидромотора; 3 – угловая скорость вала рабочего органа экскаватора; 4 – давление рабочей жидкости в напорной магистрали привода ротора

Предложенная в качестве критерия нормированная динамическая мощность $\overline{P(t)}$ на валу гидромотора привода роторного рабочего органа траншейного экскаватора без учета потерь, как критерий оценки состояния системы привода рабочего органа траншейного экскаватора, определяется из уравнения:

$$\overline{P(t)} = \frac{M(t) \cdot \omega_{ГМ}(t)}{P_{дв}} \quad (15)$$

Преимуществом такого критерия является возможность не только оперативно оценить адаптивные свойства привода по отношению к входным нагрузкам, воздействующих на рабочие органы землеройно-транспортных машин, но и появляющаяся возможность решения задач управления параметрами и оценки уровня соответствия гидромеханического нерегулируемого привода условиям эксплуатации.

Вычисление абсолютного значения мгновенной механической мощности в имитационной модели гидромеханической подсистемы привода рабочего органа реализовано блоком суммирования 2, блоком умножения 1 и блоком abs, определяющим абсолютное значение (рис. 9). Математическая модель, содержащая уравнения состояния и уравнения связи позволяет установить функциональную зависимость между пульсацией давления гидропривода, конструктивными параметрами привода рабочего органа траншейного экскаватора, характеристиками разрабатываемой среды и критерием оценки работоспособности системы привода.

Показатель динамической мощности на валу гидромотора привода ротора применим на стадии проектирования гидрообъемных трансмиссий траншейных экскаваторов и позволяет уточнить коэффициент запаса мощности при выборе

типоразмера гидромотора с учетом конструктивных особенностей рабочего органа, прочностных характеристик разрабатываемого сезонно-мерзлого грунта и действующих на систему привода моментов сопротивления, а также проанализировать нагрузки в приводе, в том числе и частотные.

5. Сопротивляемость разработке мерзлых грунтов целесообразно оценивать коэффициентом прочности, учитывающим вероятностные характеристики гранулометрического состава, температурный режим промерзания, влажность, позволяющим повысить точность прогнозирования оптимального комплекта машин для эффективного выполнения земляных работ. При оценке коэффициента прочности мерзлых грунтов неоднородных по составу дополнительно учитываются не только процентное содержание гравийно-галечниковых включений, но и температура, влажность и температурный режим промерзания.

Результатом обобщения полученной экспериментальной информации стали зависимости коэффициента прочности $K_{пр}$ от основных физико-механических характеристик сезонно-мерзлых грунтов. Следует отметить, что зависимости даны в двух вариантах: от числа ударов плотномера ДорНИИ и температуры грунта, что позволяет произвести пересчет значений $K_{пр}$ при появлении новых методов оценки состояния грунта.

Для однородных сезонно-мерзлых грунтов данная зависимость имеет следующий вид:

$$K_{пр} = 3,324(1,038 - 0,0227C + 0,00015C^2) (-0,436 + 1,157H - 0,146H^2) \times (1,975 - 0,159J_P + 0,00412 J_P^2); \quad (16)$$

$$K_{пр} = 3,206(0,202 + 0,210t + 0,002t^2) (-0,509 + 1,258H - 0,1380H^2) \times (1,026 + 0,0181\omega - 0,00082\omega^2) (1,615 - 0,115J_P + 0,00345 J_P^2). \quad (17)$$

Для сезонно-мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями:

$$K_{пр} = 5,841 (11,922 - 0,310C + 0,00203C^2) (-0,912 + 3,106H - 0,405H^2) \times (0,264 + 0,0375\xi_1 + 0,00044 \xi_1^2) (0,696 + 0,0828\xi_2 - 0,00388 \xi_2^2) \times (0,687 + 0,199\xi_3 - 0,0943 \xi_3^2) (1,158 + 0,0987J_P - 0,0184 J_P^2) \quad (18)$$

$$0,5 \leq H \leq 2,5 \text{ м}; \quad 9 \leq \xi_1 \leq 30 \text{ \%}; \quad 0 \leq \xi_2 \leq 18 \text{ \%}; \quad 0 \leq \xi_3 \leq 6 \text{ \%}; \quad C \geq 75;$$

$$K_{пр} = 5,836 (0,354 + 0,240t + 0,0385t^2) (1,005 - 0,00448H + 0,00097H^2) \times (0,741 - 0,0332\xi_1 + 0,00265 \xi_1^2) (0,685 + 0,0609\xi_2 - 0,00210 \xi_2^2) \times (0,638 + 0,172\xi_3 - 0,00627 \xi_3^2) (1,090 + 0,199J_P - 0,0301 J_P^2), \quad (19)$$

где C – число ударов плотномера ДорНИИ ($C \geq 75$); H – глубина промерзания ($0,4 \leq H \leq 4,5$), м; J_P – число пластичности; t – отрицательная температура грунта ($T \leq -3$), °С; ω – влажность грунта, %; ξ_1 – процентное содержание гравийно-галечниковых включений размером от 10 до 30 мм; ξ_2 – то же, от 30 до 70 мм; ξ_3 – то же, свыше 70 мм.

Представленные математические зависимости, определяющие влияние физико-механических свойств мерзлого грунта на показатель прочности, неудобны для практического использования. В этой связи большую наглядность и меньшую трудоемкость при определении коэффициента прочности разработки сезонно-мерзлых грунтов представляют собой номограммы (рис. 12, 13).

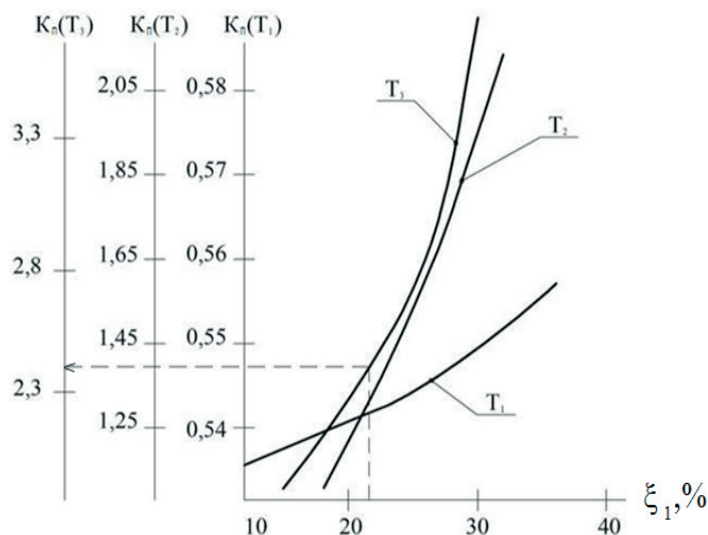


Рисунок 12. Номограмма определения коэффициента прочности однородных мерзлых грунтов

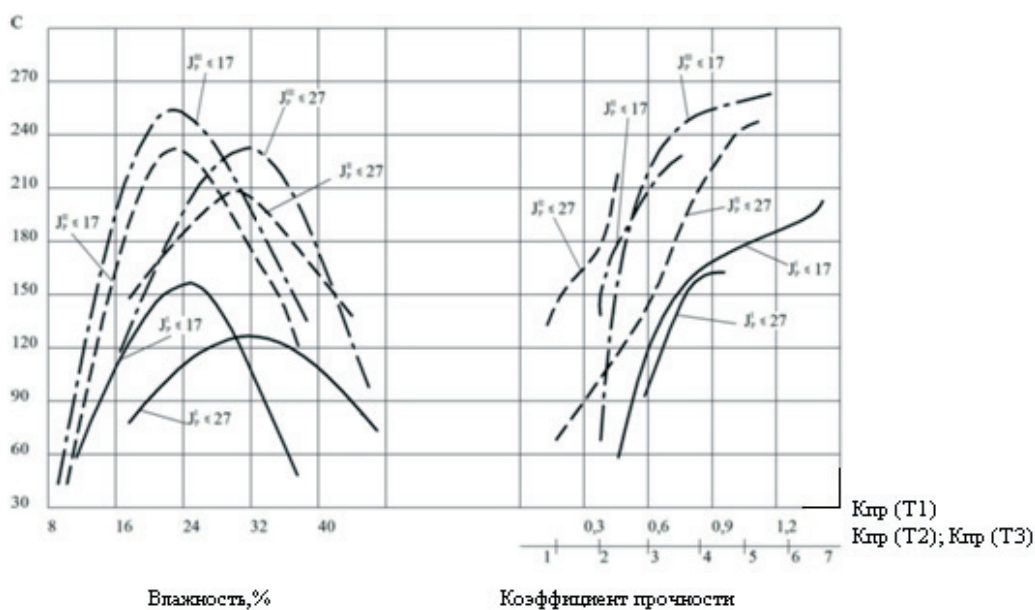


Рисунок 13. Номограмма определения коэффициента прочности однородных мерзлых грунтов (глина, суглинок). $K_{пр}(T_2) - 1\text{ }^\circ\text{C} < t \leq -5\text{ }^\circ\text{C}$, $H \leq 1,2\text{ м}$; $K_{пр}(T_3) - 5\text{ }^\circ\text{C} < t < -10\text{ }^\circ\text{C}$, $1,0\text{ м} < H \leq 2,5\text{ м}$; $K_T(T_4) t \leq -10\text{ }^\circ\text{C}$, H более $2,5\text{ м}$

Значения коэффициента прочности сезонно-мерзлого грунта позволяет обосновано выбирать типоразмер землеройной машины, определять область оптимального использования с учетом физико-механических свойств грунтового массива.

6. Разработана методика определения оптимальных параметров экологически чистых полимерных поропластов, основанная на учете температурных профилей промерзания грунта для предварительной их подготовки к разработке в зимний период года, получены температурные профили промерзания однородных и не однородных утепленных грунтов, установлены значения коэффициентов влияния сроков нанесения карбамидного поропласта относительно начала промерзания грунта для основных видов грунтов исследуемого региона.

Расчет необходимой толщины пены-утеплителя на карбамидной основе для предохранения грунта от сезонного промерзания по среднестатистическим метеорологическим данными месячных температур, высоты снежного покрова, плотности снежного покрова и количества суточных градусо-часов отрицательных температур производится по формуле

$$H = K_y L_u (K_p K_\tau K_W R_o - R_c), \quad (20)$$

где K_y – коэффициент усадки карбамидного поропласта; L_u – коэффициент теплопроводности утеплителя, ккал/м·час·°С; K_p – коэффициент влияния плотности грунта; K_τ – коэффициент влияния времени нанесения поропласта; K_W – коэффициент влияния влажности грунта; R_o – общее термическое сопротивление, требуемое для предохранения грунта от промерзания, м²·час·°С/ккал; R_c – термическое сопротивление снега, м²·час·°С/ккал.

Коэффициент влияния объемной плотности (K_p) зависит от типа грунта и его гранулометрического состава. Для практических расчетов рекомендуется принимать значение $K_p = 1,00$ для грунтов плотностью от 1500 до 1700 кг/м³ и $K_p = 0,85$ для грунтов плотностью от 1700 кг/м³ и более. Значение коэффициента влияния влажности грунта (K_W) рекомендуется принимать при влажности грунта от 8 до 20 % равным 1,35, а при влажности грунта более 20 % значение коэффициента равняется 0,71.

Значения фактических градусо-часов отрицательных температур каждого месяца позволяют определить по графику рис. 14 термическое сопротивление мерзлого грунта.

Тепловые потери с каждого 1 м² грунта под покрытием карбамидным поропластом определяются по формуле:

$$Q = H \cdot (G \cdot L + 0,5 t_m \cdot C_{мг}), \quad \text{ккал/м}^2, \quad (21)$$

где H – глубина сезонного промерзания грунта, м; G – содержания льда в мерзлом грунте, кг/м³; L – удельная теплота плавления льда, ккал/кг; t_m – температура мерзлого грунта, °С; $C_{мг}$ – объемная теплоемкость мерзлого грунта, ккал/м³·°С.

Исходя из полученных значений фактических градусо-часов отрицательных температур, воздействующих на грунт по номограмме (рис. 14) находится общее термическое сопротивление поропласта, способное защитить грунт от промерзания.

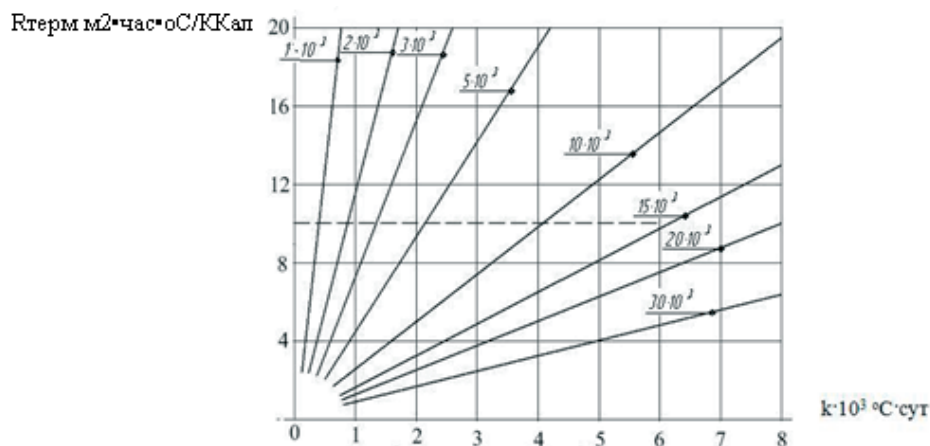


Рисунок 14. Зависимость термического сопротивления грунта от индекса промерзания и допустимых тепловых потерь

Термическое сопротивление снега определяется по формуле

$$R_c = h_c / \alpha_c, \quad (22)$$

где h_c — высота снежного покрова, м; α_c — коэффициент теплопроводности снега, ккал/час·град.

Эта идея реализована в композиции карбамидного поропласта, защищенного патентом № 2411267 от 10.02.2011 г.

По результатам натурального эксперимента выявлено, что увеличение общего термического сопротивления карбамидного поропласта и снежного покрова приводит к изменению распределения температуры грунта по глубине, резко отличающемуся от ее распределения в условиях естественного промерзания.

Исследованиями, проведенными в условиях натурального эксперимента, получены распределения температур грунта в начале его промерзания при разных значениях общего термического сопротивления в условиях естественного состояния грунта, покрытого снежным покровом высотой 200 мм и в условиях утепления карбамидным поропластом и снежным покровом.

Экспериментальные исследования теплопроводности α_c снежного покрова выявили существенное влияние температуры окружающего воздуха и плотности снежного покрова ρ_c , при этом определено пороговое значение температуры — 10 °C и получены уравнения аппроксимации:

$$\left. \begin{aligned} &\text{Для диапазона температур от } -1^\circ\text{C до } -10^\circ\text{C;} \\ &\alpha_c = 1,7445987 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_c^2 + 5,9389402 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_c + 0,0273363. \\ &\text{Для диапазона температур от } -10^\circ\text{C до } -20^\circ\text{C;} \\ &\alpha_c = 1,9629831 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_c^2 + 4,1298844 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_c + 0,0351067. \\ &\text{Для диапазона температур от } -20^\circ\text{C до } -30^\circ\text{C;} \\ &\alpha_c = 1,7112416 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_c^2 + 4,238921 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_c + 0,0332151. \\ &\text{Для диапазона температур от } -30^\circ\text{C до } -40^\circ\text{C;} \\ &\alpha_c = 1,7676153 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_c^2 + 3,8117726 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_c + 0,0337707. \\ &\text{Для диапазона температур от } -40^\circ\text{C до } -50^\circ\text{C;} \\ &\alpha_c = 2,1880885 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_c^2 + 2,8098883 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_c + 0,0365393. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Например, на глубине 200 мм температура глины в естественных условиях была равна 0,1 °С, при укрытии поропластом с общим термическим сопротивлением 5,16 (м²·°С)/Вт – 0,7 °С в сочетании со снежным покровом на глубине 0,6 м – соответственно 1,3 и 3,9 °С; на глубине 1,0 м – 2,5 и 6,0 °С и т. д. (рис. 15). Такое распределение температуры грунта наблюдается при воздействиях 22,8 тыс. градусо-часов.

Сравнение графиков промерзания супеси и суглинка естественной влажности в условиях промерзания на глубину 0,5 м (рис. 15–17, 1 – в условиях естественного промерзания; 2 – в условиях утепления карбамидным поропластом) показывает, что снижение значения температуры супеси происходит интенсивнее, а точка перехода грунта из талого состояния в мерзлое при утеплении супеси находится на глубине 0,35 м, суглинка на глубине 0,10 м. При общем термическом сопротивлении утеплителя и снежного покрова равном 0,86 (м²·°С)/Вт для увеличения глубины промерзания грунта от 0,10 до 0,20 м потребовалось 6 тыс. градусо-часов, а при общем термическом сопротивлении утеплителя и снежного покрова, равном 1,72 (м²·°С)/Вт – 10 тыс. градусо-часов.

При промерзании супеси на глубину 0,50 м (рис. 16) разница температур грунтов на глубине 1,0 м в естественных условиях и условиях утепления снегом и карбамидным поропластом с общими термическими сопротивлениями 0,86 и 5,16 (м²·°С)/Вт, достигает 2,7 °С. Такое распределение температуры супеси наблюдалось при 46,4 тыс. градусо-часов. Это свидетельствует о том, что с увеличением общего термического сопротивления содержащееся в толще грунта тепло полностью используется для предохранения его от промерзания.

Исследование процесса промерзания суглинка с 30 % содержанием гравийно-галечниковых включений в естественных условиях и условиях утепления поропластом позволило выявить уменьшение угла наклона кривой промерзания утепленного грунта (рис. 18), что свидетельствует об уменьшении тепловых потерь и уменьшении глубины промерзания.

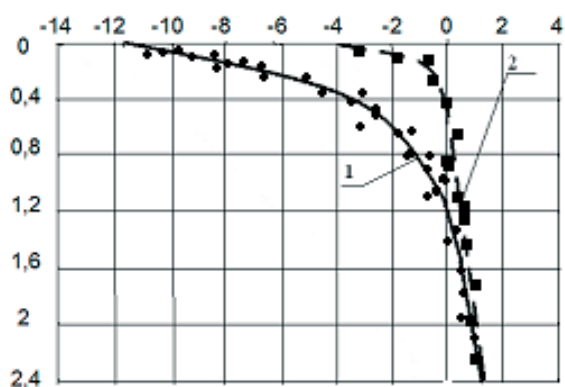


Рисунок 15. Изменение температуры глины влажностью 12–23 % по глубине залегания при режиме промерзания T2

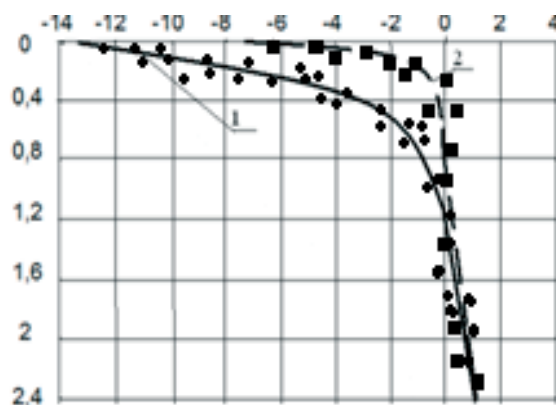


Рисунок 16. Изменение температуры супеси влажностью 10–18 % по глубине залегания при режиме промерзания T2

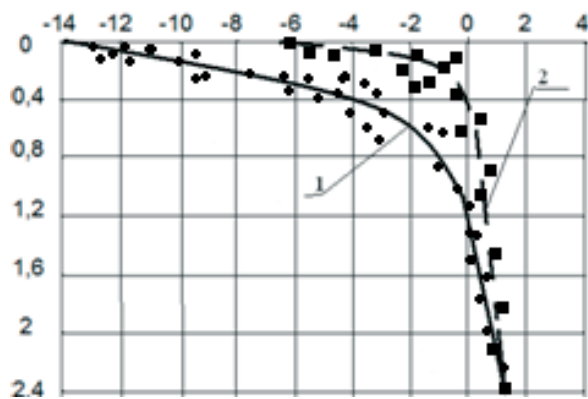


Рисунок 17. Изменение температуры суглинка влажностью 13–20 % по глубине залегания при режиме промерзания T2

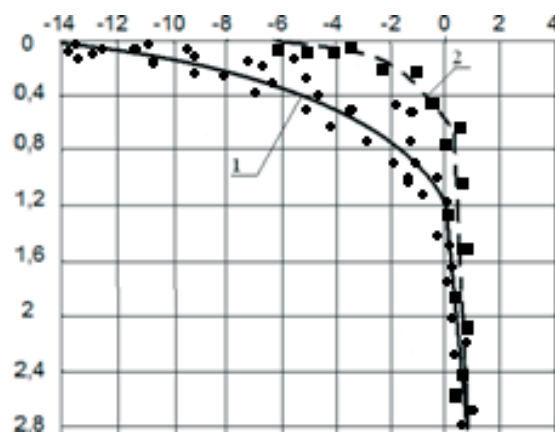


Рисунок 18. Изменение температуры суглинка влажностью 16 % с 13–30 % содержанием гравийно-галечниковых включений по глубине залегания при режиме промерзания T2

Разница температур грунта в естественных условиях залегания и в условиях утепления увеличивается по глубине залегания грунта и на глубине 0,8 м достигает наибольшего значения 2,1 °С.

Приведенные удельные затраты на разработку подготовленных (утепленных) однородных грунтов траншейными экскаваторами снижаются на 10–15 %, а удельные затраты на разработку подготовленных грунтов с гравийно-каменистыми включениями в первую очередь зависящих от гранулометрического состава и процентного содержания фракций в разрабатываемых грунтах в отдельных случаях могут снижаться и на 20 %.

Графики функции температуры утепленного грунта по глубине его залегания для зимних месяцев года позволяют оценить коэффициент их прочности сезонно-мерзлых грунтов.

Натурные исследования процесса сезонного промерзания грунтов выявили одинаковый характер зависимости глубины промерзания и температуры всего разнообразия грунтов исследуемого региона под слоем карбамидного поропласта, независимо от их гранулометрического состава с учетом краевого эффекта что позволяет определить дополнительную ширину утепляемого участка. Экспоненциальная зависимость величины проникновения фронта отрицательных температур под утепляемый слой не существенно зависит от гранулометрического состава грунта, основным параметром является влажность грунта.

Температура утепленных грунтов под слоем карбамидного поропласта существенно изменяется по глубине залегания разрабатываемого слоя и от времени нахождения в зоне отрицательных температур (рис. 19).

Для каждой функции распределения температур утепленного суглинка, характерных для зимних месяцев северной зоны Красноярского края надежно описаны полиномами второй степени (табл. 4).

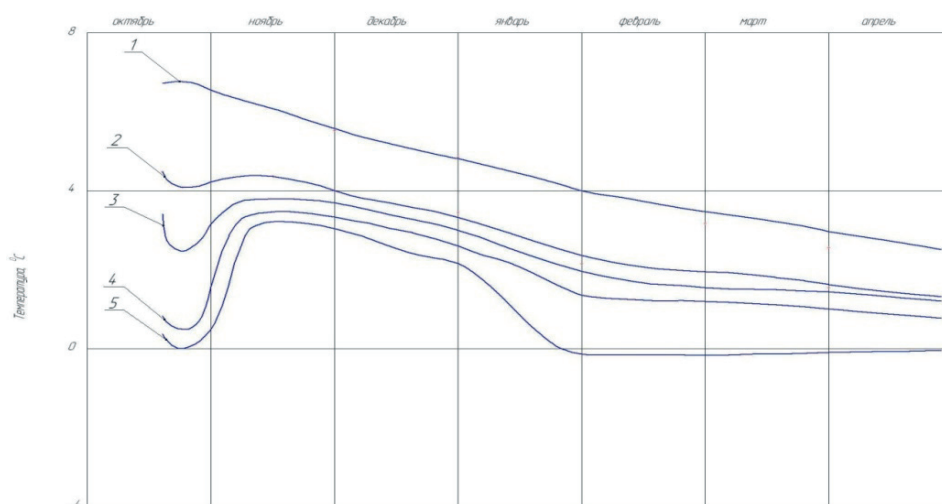


Рисунок 19. Изменение температуры суглинка от времени промерзания в середине утепленной полосы на различных глубинах: 1 – 2 м; 2 – 1 м; 3 – 0,5 м; 4 – 0,2 м; 5 – пограничный слой грунта под теплоизоляцией

Таблица 4

Распределения температур по глубине утепленного суглинка

Расчетный месяц	Распределение отрицательных температур (t) по глубине залегания (H) утепленного суглинка	Коэффициент корреляции
Ноябрь	$t = -0,1013729H^2 - 0,5575497H - 0,4741855$	0,98
Декабрь	$t = -0,0360997H^2 - 0,5072688H - 1,6369544$	0,94
Январь	$t = -0,0239553H^2 - 0,4517715H - 2,1028933$	0,98
Февраль	$t = -0,0250972H^2 - 0,4950154H - 2,4443109$	0,96

Таким образом, нанесение карбамидного порошката расчетной толщины в осенний подготовительный период на участки, планируемые к разработке землеройными машинами в зимний период года, надежно предохраняет грунт от сезонного промерзания. Установлено снижение приведенных удельных затрат на разработку утепленных грунтов траншейными экскаваторами и, как следствие, повышение интенсивности процесса разработки предварительно подготовленных грунтов в сравнении с мерзлыми грунтами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении настоящей работы получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Доказано, что с учетом условий и особенностей работы траншейных экскаваторов, для комплексной оценки сопротивляемости резанию мерзлых однородных по составу грунтов, показатели влажности грунта, его гранулометрический состав и величина температуры имеют определяющее значение. Для мерзлых грунтов, содержащих включения, наряду с указанными показателями существенное влияние оказывают частота встречаемости и вероятность распределения фракционного состава включений в грунтах. Сопротивление резания утеп-

ленных однородных грунтов и грунтов с включениями не зависит от их гранулометрического состава.

2. Установлено, что геометрические параметры гравийно-галечниковых включений в мерзлых грунтах адекватно описываются регрессионными зависимостями второго-третьего порядка, а частота встречаемости и вероятность распределения фракционного состава включений в грунтах Восточно-Сибирского региона подчиняется закону распределения Пуассона.

3. Выявлено наличие двух кластеров грунтов Восточно-Сибирского региона, идентифицированных по закону распределения гравийно-галечниковых включений: к первому кластеру отнесены грунты северной и южной зоны Красноярского края и грунты Якутской АССР; ко второму кластеру отнесены грунты Бурятской АССР, Иркутской области и БАМа, что позволяет прогнозировать эффективность их разработки уже на этапе создания будущих проектов грунтовых работ на названных территориях.

4. Предложен критерий оценки сопротивляемости мерзлых грунтов разработке (коэффициент прочности), учитывающий вероятностные характеристики гранулометрического состава, температурный режим промерзания, влажность и процентное содержание гравийно-галечниковых включений, позволяющий повысить точность прогнозирования оптимального комплекта машин для выполнения земляных работ.

5. Предложенные номограммы определения прочности мерзлых однородных и неоднородных грунтов, полученные графоаналитическим методом, позволяют повысить оперативность определения области использования каждого из типоразмеров траншейных экскаваторов, обоснованно осуществлять инженерное районирование исследованной территории с точки зрения возможности и эффективности применения существующих типоразмеров машин, а также определять перспективные направления создания новой техники для разработки сезонно-мерзлых грунтов.

6. Впервые разработана имитационная математическая модель оценки работоспособности систем гидромеханического привода рабочих органов траншейных экскаваторов, работающих в динамических режимах, позволяющая оценить уровень динамической мощности, затрачиваемой системой привода на разработку мерзлых грунтов и обосновано принять коэффициент запаса мощности при выборе гидромотора привода рабочего органа, а также проанализировать нагрузки в приводе, как статические, так и частотно-динамические.

7. Разработана композиция экологически чистого карбамидного поропласта в качестве утеплителя сезонно-мерзлых грунтов по ТУ 2254-001-02067876-2009 «Поропласты композиционные», позволяющая существенно уменьшить глубину и температуру промерзания разрабатываемого грунта и, как следствие, снизить значение коэффициента прочности грунтов и экологическую нагрузку на утепляемый грунт (пат. РФ № 2411267, С08L61/24 С08J9/06), установлены значения коэффициентов влияния сроков нанесения карбамидного поропласта относительно начала промерзания грунта для основных видов грунтов исследуемого региона. Композиция имеет «Паспорт безопасности», зарегистрированный в Федеральном агентстве технического регулирования и метрологии.

8. Установлено пороговое значение температуры окружающего воздуха, равное -10°C , влияющее на значение коэффициента теплопроводности снежного покрова, получены уравнения регрессии изменения коэффициента теплопроводности снега от его плотности в температурном диапазоне от -1 до -50°C .

9. Использование метода подготовки 15 тыс. м^3 грунта к экскавации в зимних условиях с применением карбамидного поропласта позволили получить годовой экономический эффект в размере 2 651 000 (два миллиона шестьсот пятьдесят одну тысячу) руб.

10. Представленная в работе методология прогнозирования эффективности разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами может быть положена в основу создания CALS-технологии оценки эффективности применения землеройных машин различного назначения на всех этапах их жизненного цикла.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

Монографии

1. Технология подготовки грунтов к разработке в зимний период при освоении полезных ископаемых Восточно-Сибирского региона [Текст]: монография / **С.И. Васильев**, В.Н. Анферов, В.М. Мелкозеров; Сиб. федер. ун-т.– Красноярск: ИПК СФУ, 2012. – 151 с.
2. Разработка сезонномерзлых грунтов Восточной Сибири траншейными экскаваторами [Текст]: монография / **С.И. Васильев**, С.П. Ереско, В.Г. Жубрин, Б.В. Осипенко; Сиб. федер. ун-т. – Красноярск: ИПК СФУ, 2010. – 139 с.

В изданиях из перечня ВАК

3. **Васильев, С.И.** Исследование адекватности вариантов имитационной математической модели гидромеханической системы привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора [Текст] / С.И. Васильев, В.И. Иванчура // Транспортное строительство. – М., 2013. – № 8. – С. 25–28.
4. **Васильев, С.И.** Вероятностные физико-механические характеристики грунтов Восточно-Сибирского региона [Текст] / С.И. Васильев, В.И. Иванчура, С.П. Ереско // Транспортное строительство. – М., 2013. – № 3 (19). – С. 28–30.
5. **Васильев, С.И.** Показатели эффективности технологий утепления грунта на стадии освоения и рекультивации нефтегазовых месторождений [Текст] / С.И. Васильев, А.С. Ортман // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2013. – № 2 (18). – С. 97–101.
6. **Васильев, С.И.** Вероятностные характеристики грунтового массива Восточно-Сибирского региона [Текст] / С.И. Васильев, С.П. Ереско, В.Г. Жубрин // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2013. – № 1 (17). – С. 85–92.
7. **Васильев, С.И.** Обобщенный критерий оценки динамических процессов гидромеханического привода рабочих органов траншейных экскаваторов [Текст] / С.И. Васильев, В.И. Иванчура // Механизация строительства. – М., 2013. – № 1 (823). – С. 11–13.

8. **Васильев, С.И.** Побочное влияние карбамидных поропластов на аквабионты при утеплении грунтов Сибири [Текст] / С.И. Васильев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – М. : ВНИИОНГ, 2012. – Вып. 9. – С. 42–47.
9. **Васильев, С.И.** Обоснование критериев оценки динамических процессов гидромеханического привода рабочих органов землеройно-транспортных машин [Текст] / С.И. Васильев, В.И. Иванчура // Системы. Методы. Технологии. – Братск: БрГУ, 2012. – № 1 (13). – С. 62–66.
10. **Васильев, С.И.** Результаты численного моделирования рабочего органа траншейного экскаватора [Текст] / С.И. Васильев, В.И. Иванчура // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 1.– Братск: БрГУ, 2012. – С. 57–62.
11. **Васильев, С.И.** Методика экспериментальных исследований процесса резания сезонно-мерзлых грунтов с включениями [Текст] / С.И. Васильев // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2011. – № 12. – С. 146–151.
12. **Васильев, С.И.** Численное моделирование рабочего процесса привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора [Текст] / С.И. Васильев, В.И. Иванчура // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2011. – № 12. – С. 152–156.
13. Евдокимов, А.Н. Аналитическое определение силы сопротивления внедрению инструмента в мерзлый грунт [Текст] / А.Н. Евдокимов, **С.И. Васильев**, В.Г. Жубрин // Системы. Методы. Технологии.– Братск : БрГУ, 2011. – № 11. – С. 115–118.
14. **Васильев, С.И.** Свойства карбамидных поропластов с древесными наполнителями для утепления сезонно-мерзлых грунтов [Текст] / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров // Науч. журнал СФУ. Сер. Техника и технологии.–2011. – № 4 (4). – С. 380–388.
15. **Васильев, С.И.** Закономерности формирования пульсаций давления в гидроприводе траншейных роторных экскаваторов при разработке мерзлых грунтов / С.И. Васильев, С.П. Ереско, Т.Т. Ереско // Строительные и дорожные машины. – М., 2011. – № 8. – С. 30–33.
16. **Васильев, С.И.** Экспериментальные и теоретические исследования свойств пеноутеплителя для предохранения грунта от промерзания в условиях Сибири [Текст] / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров, А.С. Ортман // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2010. – № 10. – С. 102–107.
17. **Васильев, С.И.** Повышение эффективности разработки сезонно-мерзлых грунтов [Текст] / С.И. Васильев // Томск, Вестник ТГАСУ. – 2010. – №1. – С. 194–200.
18. **Васильев, С.И.** Исследование прочностных характеристик сезонно-мерзлых грунтов Сибири и Севера [Текст] / С.И. Васильев, С.П. Ереско // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2010. – № 5. – С. 93–99.
19. **Васильев, С.И.** Исследование эксплуатационных характеристик карбамидного поропласта как утеплителя грунтов для предохранения от сезонного промерзания [Текст] / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2010. – № 7. – С. 109–115.
20. **Васильев, С.И.** Исследование процесса резания мерзлых грунтов с гравийно-галечниковыми включениями роторными рабочими органами [Текст] /С.И.

Васильев, С.П. Ереско // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2010 – № 8. – С. 145–153.

21. **Васильев, С.И.** Прогнозирование условий разработки сезонно-мерзлых грунтов [Текст] / С.И. Васильев, С.П. Ереско, Б.В. Осипенко // Наука и техника в дорожной отрасли. – М. : МАДИ, 2010. – № 4 . – С. 35–38.
22. **Васильев, С.И.** Повышение эффективности разработки сезонно-мерзлых грунтов [Текст] / С.И. Васильев // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2009. – № 3. – С. 96–98.
23. **Васильев, С.И.** Эффективность эскавации утепленных мерзлых грунтов с каменистыми включениями [Текст] / С.И. Васильев // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БрГУ, 2009. – № 2. – С. 91–93.
24. Ереско, С.П. Моделирование рабочего процесса агрегатов машины для строительства зимних дорог и аэродромов [Текст] / С.П. Ереско, **С.И. Васильев**, В.Э. Ронгонен, В.Г. Жубрин, В.Л. Шустов // Строительные и дорожные машины. – М., 2008. – № 3. – С. 40–45.
25. **Васильев, С.И.** Показатели эффективности разработки мерзлых грунтов рабочими органами землеройных машин [Текст] / С.И. Васильев, С.П. Ереско, Б.В. Осипенко, В.Л. Шустов // Горные машины и автоматика. – 2003. – № 10. – С. 22–24.

В изданиях, приравненных к перечню ВАК

26. **Васильев, С.И.** Экономическая эффективность утепления сезонно-мерзлых грунтов карбамидными порошкатами для разработки рабочими органами строительно-дорожных машин [Текст] / С.И. Васильев, Л.Н. Родикова // Интерстроймех-2011: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2011. – С. 322–328.
27. **Васильев, С.И.** Моделирование системы стабилизации давления в гидроприводе траншейного экскаватора [Текст] / С.И. Васильев, С.П. Ереско // Интерстроймех-2011: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2011. – С. 31–35.
28. **Васильев, С.И.** Оценка прочностных характеристик сезонно-мерзлых грунтов графо-аналитическим методом [Текст] / С.И. Васильев, С.П. Ереско // Интерстроймех-2009: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Кырг. гос. ун-т строит-ва, трансп. и арх. – Бишкек, 2009. – С. 190–196.
29. **Васильев, С.И.** Вероятностные прочностные характеристики грунтов Восточной Сибири [Текст] / С.И. Васильев // Mechanics development issues // Mechanics development issues Collection of papers 18–20 June 2009. Ulaanbaatar Mongolia. – P. 33–37.
30. **Васильев, С.И.** Прогнозные физико-механические характеристики мерзлых грунтов с каменистыми включениями [Текст] / С.И. Васильев, С.П. Ереско, Б.В. Осипенко // Механика – XXI веку : VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Братск, 2008. – С. 380–384.
31. **Васильев, С.И.** Математическое моделирование процесса работы траншейного экскаватора [Текст] / С.И. Васильев, С.П. Ереско // Решетневские чтения : материалы 11-й Междунар. конф. – Красноярск: СибГАУ, 2007. – С. 119.
32. **Васильев, С.И.** Ресурсосберегающие технологии подготовки сезонно-мерзлых грунтов к разработке [Текст] / С.И. Васильев, С.П. Ереско, В.Г.

- Жубрин, В.М. Мелкозеров // Энергетика в глобальном мире : тез. Междунар. науч.-техн. конгр. с междунар. участием. – Братск, 2007. – С. 22–25.
33. **Васильев, С.И.** Совершенствование конструкции гидропривода роторного траншейного экскаватора [Текст] / С.И. Васильев, С.П. Ереско, Т.Т. Ереско, В.Г. Жубрин, В.Л. Шустов // Механика – XXI веку: VI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Братск, 2007. – С. 22–25.
34. **Васильев, С.И.** Математическое моделирование процесса работы траншейного экскаватора [Текст] / С.П. Ереско, С.И. Васильев // Системные проблемы надежности, качества и информационных и электронных технологий (Инноватика-2005) : материалы Междунар. конф. и Российской науч. школы. – Ч. 4. – М. : Радио и связь, 2005.– С. 25.
35. **Васильев, С.И.** Вероятностные физико-механические характеристики мерзлых грунтов [Текст] / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин // Системные проблемы надежности, качества, информационные технологии: материалы Междун. конф. и Российской науч. школы. – Ч. 2. – М.: Радио и связь, 2004. – С. 51.
36. **Васильев, С.И.** Типовые условия эксплуатации землеройной техники [Текст] / С.И. Васильев // Системные проблемы надежности, качества, информационные технологии: материалы Междунар. конф. и Российской науч. школы. – Ч. 2. – М.: Радио и связь, 2004. –С. 52.
37. **Васильев, С.И.** Обоснования критерия оценки эффективности разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами [Текст] / С.И.Васильев, В.Г. Жубрин. – М., 1986. – 12 с. Деп. в ЦНИИТЭстроймаш, 04.07.86, № 112 СД 86.
38. **Васильев, С.И.** Результаты исследования технико-экономической модели оценки эффективности разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами [Текст] / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин, З.С. Ташпаева. – Деп. в ЦНИИТЭстроймаш 29.04.87, № 56 СД87.
39. Мирзоян, Г.С. Оптимизация параметров гидропривода роторного траншейного экскаватора по величине производительности [Текст] / Г.С. Мирзоян, **С.И. Васильев**, В.Ю. Мануйлов, С.Е. Сабуренков.– М., 1984. – 8с. – Деп. В ЦНИИТЭстроймаш, 05.07.84, № 77 СД 84.
40. **Васильев, С.И.** Принципы классифицирования мерзлых грунтов на основе использования коэффициента трудности разработки [Текст] / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин, З.С. Ташпаева. – М., 1983. – 14 с. – Деп. в ЦНИИТЭстроймаш, 30.03.83, № 34 СД 83.
41. Мирзоян, Г.С. Силовые характеристики гидрообъемной трансмиссии привода рабочих органов двухроторных экскаваторов [Текст] / Г.С. Мирзоян, А.И. Тархов, Э.Г. Школьник, **С.И. Васильев**. – М., 1983. – 10 с. – Деп. В ЦНИИТЭстроймаш, 30.03.83, № 34 СД-Д83.
42. Мирзоян, Г.С. Формализация внешних нагрузок на привод рабочих органов двухроторного экскаватора [Текст] / Г.С. Мирзоян, З.Е. Гарбузов, Ю.П. Егоров, **С.И. Васильев**, С.Е. Сабуренков, В.В. Минин. – М., 1983. –12с.–Деп. В ЦНИИТЭстроймаш 21.01.83, № 9 СД-Д83.
43. Мирзоян, Г.С. Формализация внешних нагрузок на привод рабочих органов двухроторного экскаватора [Текст] / Г.С. Мирзоян, З.Е. Гарбузов, Ю.П.

Егоров, С.И. Васильев, С.Е. Сабуренков, В.В. Минин. – М., 1983. – 12 с. – Деп. в ЦНИИТЭстроймаш 21.01.83, № 9 СД-Д83.

44. **Васильев, С.И.** Мобильный промышленный комплекс по производству в полевых условиях полимерного теплоизоляционного материала и сорбентов [Текст] / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров; ЦНТИ, Красноярск, 2008. – 4 с. – (Информ. листок № ИЛ 029-077).
45. **Васильев, С.И.** Способ предохранения грунтов Восточно-Сибирского региона от промерзания с использованием инновационных материалов [Текст] / С.И. Васильев, В.М. Мелкозеров ; ЦНТИ, Красноярск, 2008. – 5 с. – (Информ. листок № ИЛ 029-078).

В других центральных и региональных изданиях

46. Родикова, Л.Н. Экономическое обоснование подготовки сезонно-мерзлых грунтов с применением карбамидных порошковых [Текст] / Л.Н. Родикова, А.С. Ортман, Е.В. Франк, **С.И. Васильев** // Проблемы социально-экономического развития Сибири. – 2012. – № 2. – С. 18–23.
47. **Васильев, С.И.** Совершенствование конструкции гидроприводов траншейных экскаваторов / С.И. Васильев, С.П. Ереско, В.Г. Жубрин, В.Л. Шустов [Текст] / Вестник университетского комплекса; НИИ СУВПТ. – Вып. 5(19). – Красноярск, 2005. – С. 84–89.
48. **Васильев, С.И.** Повышение эффективности работы траншейных экскаваторов [Текст] / С.И. Васильев, Б.В. Осипенко, В.Г. Жубрин // Транспортные средства Сибири: межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 7. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2003. – С. 452.
49. **Васильев, С.И.** Техничко-экономические показатели работы траншейных экскаваторов [Текст] / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин, Б.В. Осипенко // Транспортные средства Сибири : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 9. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2003. – С. 445–449.
50. Носков, Д.Г. Физико-механические свойства каменистых грунтов [Текст] / Д.Г. Носков, **С.И. Васильев**, Б.В. Осипенко // Транспортные средства Сибири.–Красноярск, 2002. – С. 515–520.
51. **Васильев, С.И.** Повышение эффективности разработки мерзлых грунтов [Текст] / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин, Д.Г. Носков // Интеллектуальные ресурсы ХТИ-филиала КГТУ. – Абакан, 2001. – С. 68.
52. **Васильев, С.И.** Классификация мерзлых грунтов по трудности разработки траншейными экскаваторами [Текст] / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин, Д.Г. Носков // Транспортные средства Сибири : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 7. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2001. – С. 47.
53. **Васильев, С.И.** Комплекс показателей влияющих на трудность разработки мерзлых грунтов траншейными экскаваторами [Текст] / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин, Д.Г. Носков // Транспортные средства Сибири: межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 7. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. – С. 470.
54. **Васильев, С.И.** Повышение эффективности разработки мерзлых грунтов [Текст] / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин, Д.Г. Носков // Транспортные средства Сибири. –Красноярск, 2000. – 358 с.
55. **Васильев, С.И.** Эффективность экскаваторов непрерывного действия при разработке сезонно-мерзлых песков с включениями [Текст] / С.И. Васильев,

В.Г. Жубрин // Совершенствование строительных и дорожных машин для Севера. – Красноярск : КрПИ, 1996. – С. 113–118.

56. **Васильев, С.И.** Оценка эффективности траншейных экскаваторов при разработке сезонно-мерзлых грунтов [Текст] / С.И. Васильев, В.Г. Жубрин // Транспортные средства Сибири ; ИТТ КГТУ. – Красноярск, 1995. – С. 355–358.
57. **Васильев, С.И.** Графический метод определения коэффициента трудности разработки сезонно-мерзлых грунтов [Текст] /С.И. Васильев, В.Г. Жубрин // Транспортные средства Сибири; ИТТ КГТУ. – Красноярск, 1994. – С. 178–182.

Патенты и авторские свидетельства

58. Динамическая модель привода роторного траншейного экскаватора с формализацией сил резания сезонно-мерзлых грунтов, работы контрольно-регулирующей аппаратуры и механического привода рабочего органа [Текст]: Свидетельство об государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616904 / **С.И. Васильев**, В.И. Иванчура, В.С. Васильев; заявитель Сибирский федеральный университет. – зарегистрировано в реестре программ 25.07. 2013.
59. Композиция для карбамидного пенопласта [Текст]: Пат. 2411267 Рос. Федерация, МКИ С08L61/24/ **С.И. Васильев**, В.М. Мелкозеров; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет.- // Б.И. 2011. № 4
60. Оптимизация затрат на эксплуатацию транспортно-технологических машин (ОЗЕТМ-ТМ) [Текст]: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009616246 /**Васильев С.И.**, Родикова Л.Н., Яричина Г.Ф., Васильев В.С.; заявитель Красноярский государственный технический университет. – Св. ГР ; зарег. в реестре программ 11.11 2009 г.
61. Программа оптимизации математических моделей симплексным методом (SIMPLEX) [Текст] Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612834: / Ереско С.П., **Васильев С.И.**, Колбасинский Д.В., Незнамов М.А, Преснов О.М.; заявитель и патентообладатель Красноярский государственный технический университет. – заявл. св. ГР; зарег. в реестре программ 21.01.2006 г.
62. Программа измерения и записи температуры жидкостей TERMOGID [Текст] Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ: № 2005611135 / Ереско С.П., Ковальский Б.И., **Васильев С.И.**, Шунькина М.А., Безбородов Ю.Н., Ереско В.С.; заявитель и патентообладатель Красноярский государственный технический университет.– М. : РОСПАТЕНТ, 16.05.2005 г.
63. Гидравлическая система [Текст]: А.С. 1379505 СССР, МКИ³ F 15 В 21/04 / В.П. Прутовых, А.Б. Ермилов, **С.И. Васильев**, С.В. Каверзин, М.П. Егоров; заявитель и патентообладатель Красноярский политехнический институт. – № 4055276; заявл. 16.04.1986; опубли. 07.03. 88. бюл. № 9.-4 с.: ил.
64. Аксиально-поршневой ступенчато-регулируемый гидромотор [Текст]: А.С. 1300190 СССР, МКИ³ F 04 В 1/26 / В.А. Байкалов, Л.Ф. Ковязин, **С.И. Васильев**, П.Н. Червов; заявитель и патентообладатель Красноярский политехнический институт. – № 3927575; заявл. 05.07.1985; опубли. 30.03.87, Бюл. № 12. – 4 с.: ил.
65. Гидравлическая система привода [Текст]: А.С. 1206509 СССР, МКИ³ F 15 В 21/04 / Г.С. Мирзоян, А.Б. Ермилов, **С.И. Васильев**, В.В. Минин; заявитель

- и патентообладатель Московский автомобильно-дорожный институт. – № 3773717; заявл. 19.07.1984; опубл. 23.01.86, Бюл. № 3. – 3 с.: ил.
66. Гидравлическая система привода [Текст]: А.С. 1193309 СССР, МКИ³ F 15 В 21/04 / С.В. Каверзин, В.А. Байкалов, **С.И. Васильев**, В.А. Новичков; заявитель и патентообладатель Красноярский политехнический институт. – № 3748764; заявл. 01.06.1984; опубл. 23.11.85, Бюл. № 43.
67. Устройство для регулирования температуры рабочей жидкости [Текст]: А.С. 1190371 СССР, МКИ³ F 15 G 05/00, F 15 D13/02 / Г.С. Мирзоян, В.В. Минин, **С.И. Васильев**, О.И. Любушкин; заявитель и патентообладатель Московский автомобильно-дорожный институт. – № 3666043; заявл. 28.11.1983; опубл. 07.11.85, Бюл. № 41.
68. Устройство для регулирования температуры рабочей жидкости открытых гидроредукторов [Текст]: А.С. 1097976 СССР, МКИ³ G 05 D 23/00 / В.Ю. Мануйлов, **С.И. Васильев**; заявитель и патентообладатель Московский автомобильно-дорожный институт. – 3563105; заявл. 16.03.1983; опубл. 15.06.84, Бюл. № 22.
69. Устройство для регулирования температуры рабочей жидкости [Текст]: А.С. 992853 СССР, МКИ³ F 15 В 13/02 / Г.С. Мирзоян, С.В. Каверзин, **С.И. Васильев**, А.Б. Ермилов; заявитель и патентообладатель Московский автомобильно-дорожный институт. – 3334299; заявл. 24.08.1981; опубл. 30.01.83, Бюл. № 4.
70. Система регулирования температуры рабочей жидкости [Текст]: А.С. 930291 СССР, МКИ³ G 05 D23/13F 15B 13/04 / А.Б. Ермилов, Г.С. Мирзоян, **С.И. Васильев**; Московский автомобильно-дорожный институт. – 2941680; заявл. 19.06. 1980; опубл. 19.06.80, Бюл. № 19.
71. Система регулирования температуры рабочей жидкости в гидроприводе [Текст]: А.С. 939852 СССР, МКИ³ F 15B 21/04 / С.В. Каверзин, **С.И. Васильев**, В.А. Мальцев, В.П. Павлов; заявитель и патентообладатель Красноярский политехнический институт. – 2896462; заявл. 20.03.1980; опубл. 30.06.82, Бюл. № 24.
72. Система регулирования температуры рабочей жидкости гидропривода [Текст]: А.С. 883577 СССР, МКИ³ F 15B 13/04 / С.В. Каверзин, В.В. Минин, **С.И. Васильев**, В.А. Мальцев, В.П. Павлов; заявитель и патентообладатель Красноярский политехнический институт. – 2880001; заявл. 06.02.1980, Бюл. № 43.
73. Система регулирования температуры рабочей жидкости в гидроприводе [Текст] А.С. 800442 СССР, МКИ³ F 15B 13/04 / В.А. Дмитриев, С.В. Каверзин, **С.И. Васильев**, С.А. Привалихин; заявитель и патентообладатель Красноярский политехнический институт. – 2761180; заявл. 27.04.1979, Бюл. № 4.

Подписано в печать _____ . Печать плоская. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,5. Тираж 100 экз. Заказ _____

Отпечатано в отделе копировально-множительной техники
Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М.Ф. Решетнёва
660014. г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31